OCTUBRE 2010

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

ASTRONOMIA
La verdad sobre la corona solar

MEDIOAMBIENTE
Acidificación de los océanos

ENCUESTA
¿Confiamos en la ciencia?

INFORMATICA
Ataques piratas a los microchips

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

EL MAR

Salvó a los humanos cuando se hallaban al borde de la extinción







SUMARIO

Octubre de 2010/ Número 409



La producción de arroz puede aumentar mediante el cultivo de variedades de alto rendimiento y tolerantes a factores ambientales adversos.



Algunas cuevas de la costa meridional africana habrían dado abrigo a la población progenitora de los humanos actuales.



La acidificación de los océanos perjudica la capacidad de crecer y reproducirse de algunas especies marinas.

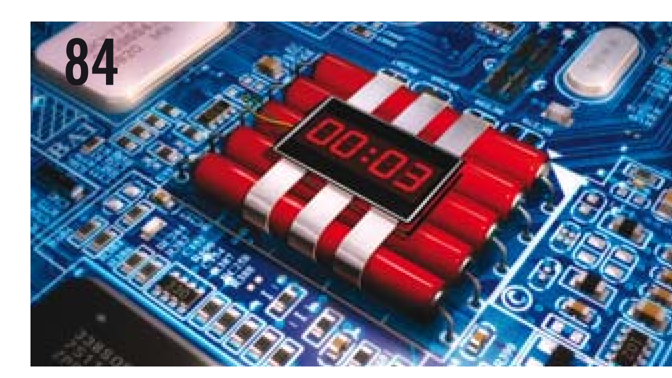
ARTICULOS



En breve, los astrónomos esperan descubrir gran cantidad de planetas rocosos no mucho mayores que la Tierra.



Los cristales de arena se forman por relleno de poros de sedimentos arenosos.



¿Qué ocurriría si nuestros equipos electrónicos viniesen con virus "de serie"?

SECCIONES

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza
Ernesto Lozano Tellechea
Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Davide Castelvecchi, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Stuart F. Brown, W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Christie Nicholson, Michelle Press, John Rennie, Michael Shermer, Sarah Simpson
ART DIRECTOR Edward Bell
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
VICE PRESIDENT, OPERATIONS AND ADMINISTRATION Frances Newburg
VICE PRESIDENT, FINANCE AND BUSINESS DEVELOPMENT Michael Florek

DISTRIBUCION
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid) - Teléfono 916 657 158

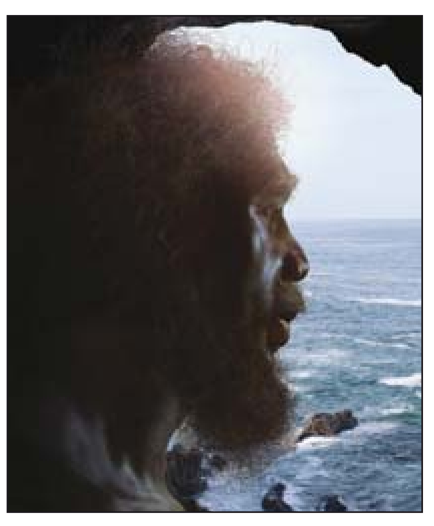
para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero Osorio: *Exoplanetas habitables* y *La verdadera corona solar*; Carlos Lorenzo: *Cuando el mar salvó a la humanidad*; José Luis García Martínez: *Mejora del arroz*; Luis Bou: *¿Confiamos en la ciencia?*; Joandomènec Ros: *La vida oceánica, amenazada*; Ana Asenjo: *Microscopía electrónica ultrarrápida*; J. Vilardell: *Hace...*; Bruno Moreno: *Apuntes* y *Ciencia y sociedad*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*; Jordi Llorca: *Taller y laboratorio*



Portada: Jean-Francois Podevin

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euros	120,00 euros
Resto del mundo	100,00 euros	190,00 euros

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Printer Industria Gráfica Ctra. N-II, km 600 - 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



¿Es el final o no?

En “Explotación de las reservas de petróleo”, Leonardo Maugeri (diciembre 2009) director de estrategias y desarrollo en una petrolera internacional, expresa la opinión generalizada en su profesión, en el supuesto de un mundo con recursos de petróleo casi inagotables, que han de explotarse bajo la presión del mercado. Maugeri desprecia especialmente nuestro artículo “Fin de la era del petróleo barato” (mayo 1998). Es difícil encontrar errores al menos en su título, puesto que el precio medio del crudo en los 10 años anteriores era de 28 dólares por barril, en la siguiente década subió hasta 45 y, por fin, alcanzó un pico de casi 150 dólares por barril en 2008.

Dado el papel esencial que desempeña en el mundo moderno la energía obtenida del petróleo, es de suma importancia que los gobiernos actúen a partir de pronósticos de agotamiento realistas, no según definiciones ambiguas e informes poco exigentes. La caída suele iniciarse cuando se ha llegado a la mitad del agotamiento, según el ejemplo de más de 50 países. La detección llegó a su cenit mundial en los años sesenta del siglo pasado y la producción debe alcanzar un máximo en correspondencia. Se encarniza el debate sobre la fecha precisa del máximo pero no se plantea lo que más importa: el largo descenso de la curva de producción una vez pasada la cresta.

Colin Campbell
Asociación para el estudio de las reservas de petróleo y gas natural
Jean Laherrère, ASPO Francia

RESPONDE MAUGERI: *Me parece que la idea al uso sobre el petróleo viene a ser precisamente la que sustentan Campbell y Laherrère: el mundo camina hacia el cenit de la producción. En mi artículo, nunca sostengo que el petróleo va a durar siempre; únicamente pongo en guardia contra quienes afirman saber cuándo va a culminar su producción, pues nadie puede calcular el futuro a partir de unas reservas desconocidas. Se trata simplemente de un enfoque no científico, como demuestran los repetidos errores en sus cálculos sobre el período de “cenit”. En realidad, todavía desconocemos buena parte de los secretos interiores del subsuelo y la dotación exacta de petróleo de nuestro planeta.*

En cuanto al precio del petróleo, tendríamos que convenir en el significado de “barato”. Lo que hoy parece caro podría tornarse mucho más barato en el futuro, gracias a los avances de la técnica. Los temores creados por un alarmismo injustificado acerca del cenit del petróleo siguen introduciendo inestabilidad y volatilidad en el mercado, perjudicando cualquier idea de desarrollo sostenible porque la incertidumbre determinaría una suerte de “parálisis inversora” en la energía.

Los nucleótidos perdidos

Aunque el artículo de Alexander S. Bradley “Geoquímica de los humeros blancos” (febrero 2010) ofrezca un relato fascinante del descubrimiento de microorganismos en un tipo previamente desconocido de ecosistema de fumarolas hidrotermales asentado en el lecho marino, no autoriza a pretender que tales hallazgos indican un posible origen de la vida en un entorno parecido al humero de la Ciudad Perdida.

Bradley sugiere que la Ciudad Perdida produce “ácidos orgánicos de pequeño tamaño como formiato y acetato” y que fumarolas similares podrían haber producido “ácidos orgánicos sencillos y quizás incluso ácidos grasos más complejos” o “al menos compuestos orgánicos sencillos”. Tales afirmaciones no llegan a abordar las condiciones y procesos que condujeron a la formación de nucleótidos (adenina, guanina, citosina, timina y uracilo) ni tampoco indican que en los humeros hidrotermales puedan encontrarse los materiales necesarios para formar los nucleótidos.

Los análisis biológicos y químicos de las fumarolas hidrotermales no han aportado información alguna sobre la evolución del ARN, el ADN y sus nucleótidos a partir de moléculas inorgánicas y orgánicas sencillas.

Richard A. Ely
Dallas, Texas

RESPONDE BRADLEY: *El lector llama la atención sobre una pregunta que se remonta a los orígenes de la investigación biológica. Suele admitirse que el ARN ha precedido al ADN como molécula transmisora de la herencia. Pero no está claro que el ARN haya sido anterior o posterior al origen del metabolismo, que depende de la química de compuestos orgánicos mucho más sencillos. Reconciliar los requisitos geoquímicos de los orígenes del ARN con los del metabolismo ha sido siempre un tema escurridizo: no tenemos todavía una teoría sobre el origen de la vida. Por ahora, lugares como la Ciudad Perdida proporcionan condiciones esenciales sobre los potenciales entornos prebióticos en la Tierra y aún más allá.*

Errata corrige

En el artículo “Anticiparse al alzheimer” del mes de agosto, en la imagen del corte frontal del cerebro de la página 30, una de las líneas que indican los ventrículos (la lateral) señala en realidad la cisura de Silvio.

En el artículo “Desarrollo embrionario y evolución” del mes de septiembre, en el epígrafe de la página 51 debe sustituirse “alcaraván” por “zarapito”.

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

La pugna de las vacunas. «La próxima primavera, en EE.UU. empezará a aplicarse, de modo regular aunque limitado, una vacuna antipoliomielítica de virus vivos. A los fabricantes cualificados se les concederá la licencia para la producción comercial de la vacuna desarrollada por Albert B. Sabin, de la Universidad de Cincinnatti. La autorización de la vacuna pone fin a 10 años de acalorada polémica entre los partidarios de las vacunas de virus vivos y los que prefieren las vacunas de virus muertos del tipo Salk. Los primeros han sostenido que una vacuna con virus vivos atenuados de la polio para eliminar el riesgo de parálisis brindaría una protección más segura y más duradera contra la polio paralítica que una vacuna inactivada, y que su administración, por vía oral, resultaría más sencilla. (El preparado Salk debe inyectarse.)»

[NOTA DE LA REDACCION: La versión de Sabin se convirtió en la vacuna estándar de EE.UU. durante los cuatro decenios siguientes. Pero desde el año 2000, aproximadamente, sólo se administra una versión modernizada de la vacuna Salk.]

Algas marinas desaprovechadas. «Resulta evidente que las algas marinas no son tan inútiles como suele suponerse. Japón representa el único país que intenta evitar el agotamiento de sus recursos de algas marinas; se dedica a cultivarlas al objeto de abastecer la demanda de ciertas especies. Con resultados alentadores, el gobierno ha estado acometiendo siembras experimentales a pequeña escala. En otras zonas de la costa, se 'siembran' en gran medida algas de la variedad laver púrpura (*Porphyra laciniata*). A partir de ella se obtienen múltiples productos alimenticios. Su cultivo constituye una de las actividades más rentables de la agricultura.»

...ciento cincuenta años

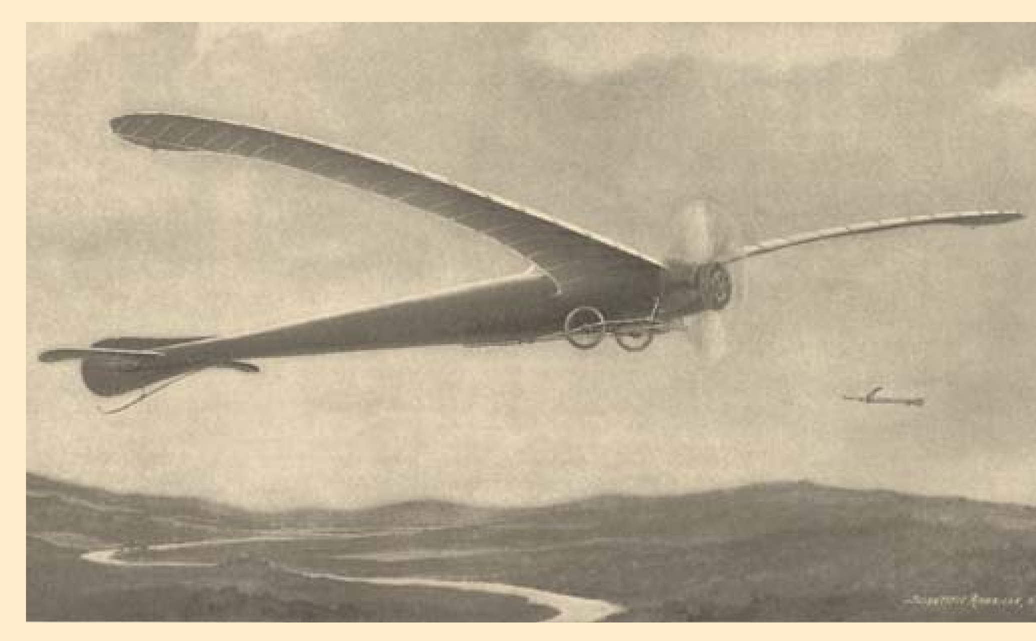
El final de la Tierra. «Se ha observado que el período de rotación del cometa Encke alrededor del Sol, de tres años y medio de duración, se acorta cada vez más; ello demuestra que el cometa está siendo atraído en dirección al Sol. Este hecho ha llevado a la conclusión general de que los planetas se mueven en un medio resistente, más tenue que nuestra atmósfera, pero aun así lo bastante denso para afectar a sus movimientos. De ahí se deduce por necesidad que nuestro planeta y sus hermanos giran en espiral acercándose al Sol, con el que acabarán chocando y a cuya masa se incorporarán. El tiempo que transcurrirá hasta este fin inexorable pertenece a esos inconcebibles períodos con que geólogos y astrónomos deben tratar.»

No a los deberes en casa. «Puede que un niño que haya pasado seis horas encerrado en el colegio deba dedicar las cuatro horas siguientes a estudiar. Pero así es imposible que su intelecto se desarrolle. Las leyes de la naturaleza son implacables. A fuerza de grandes y penosos esfuerzos, el niño logrará repetir como un loro numerosas palabras. Pero con su potencia mental del todo exhausta, le resultará de todo punto imposible dominar y comprender las lecciones. De este modo, el sistema debilita el intelecto aún más que el cuerpo. Nunca deja de sorprender que, ante la visión de una niña tambaleándose hacia casa cargada de libros, o frunciendo el ceño sobre ellos a las ocho de la tarde, nuestros ciudadanos no se armen al instante de trinchantes, atizadores, garrotes, losas u otras armas a mano, y salgan a la caza de los responsables de nuestras escuelas, tal como harían con unas bestias salvajes que estuvieran devorando a sus hijos.»

...cien años

El avión de carreras. «Es posible predecir con bastante certeza las características principales del avión del futuro que se construya meramente para participar en carreras. El año pasado se consiguió aumentar la velocidad en vuelo rectilíneo, de 80 a 120 kilómetros por hora. En respuesta a la pregunta sobre la velocidad que alcanzaría una máquina de esa especie, creemos que gracias a la suavidad de sus líneas, la ausencia total de cables, montantes y otras superficies que consumen energía, y dada la lisura de la superficie del revestimiento, no cabe menos esperar de tal máquina unas velocidades de 160 a 200 kilómetros por hora.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CIII. N.º 17; 22 DE OCTUBRE DE 1910



AVION DE CARRERAS DEL FUTURO, tal como se imaginaba en 1910.

MATERIALES

Papiroflexia programable

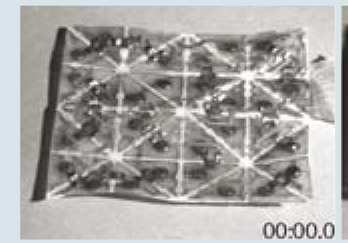
Un grupo de investigadores ha creado un dispositivo que puede doblarse para tomar otra forma cuando se le ordena. De momento, el pequeño artilugio sólo imita el aspecto de rudimentarios barcos y aviones de papel, pero en un futuro la idea quizá produzca objetos más elaborados, con capacidad de adoptar cualquier forma conveniente.

Las hojas que se pliegan solas no son sino una de las posibilidades de la materia programable. "En lugar de programar bits, programamos las propiedades mecánicas del objeto", afirma Daniela Rus, experta en robótica del Instituto de Tecnología de Massachusetts. El sistema consiste en una delgada hoja fabricada a partir de un compuesto de resina y fibra de vidrio. Mide apenas unos centímetros de largo y se encuentra segmentado en 32 paneles triangulares separados por juntas flexibles de silicona. Algunas de ellas poseen accionadores sensibles a la temperatura que se doblan 180 grados cuando se calientan por efecto de una corriente eléctrica. Según el programa utilizado, la hoja realizará una serie de dobleces u otra y adoptará la forma de un barco o la de un avión en apenas 15 segundos.

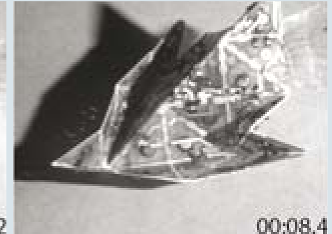
Los investigadores afirman que, en principio, el sistema podría dar lugar a muchas otras formas. "Buscábamos un modo de integrar diferentes funcionalidades en una simple hoja", afirma Robert J. Wood, ingeniero eléctrico de la Universidad de Harvard.

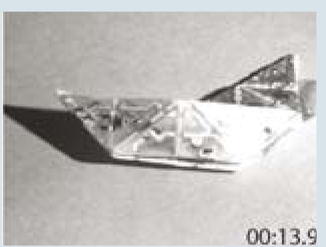
A corto plazo, Rus prevé que esta técnica papirofléxico-informática sirva como base para visualizaciones tridimensionales, como mapas que reproduzcan a voluntad la topografía de una región determinada. En un futuro más lejano sería posible ir más allá de la programación de formas y programar propiedades ópticas, eléctricas o acústicas.

—John Matson









SECUENCIA DE LA TRANSFORMACION del nuevo dispositivo, programado para doblarse y adoptar la forma de un barco de papel.

CORTESIA DEL LABORATORIO DE MICROROBOTICA DE HARVARD *(arriba)*

NEUROCIENCIA

Potenciadores de la memoria

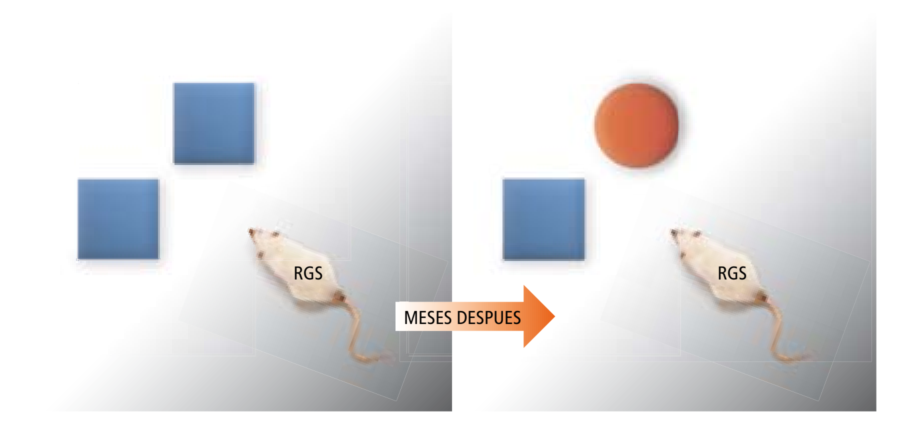
La pérdida de memoria afecta a la mayoría de las personas que padecen enfermedades neurológicas y neurodegenerativas. El elevado coste del tratamiento y el deterioro de la calidad de vida de los pacientes constituyen un grave problema social. El trastorno es, además, uno de los que más castiga a la población anciana, que ve mermada su autonomía.

En nuestro laboratorio de neurobiología, junto con Zafar U. Khan, J. F. López Téllez, I. Navarro y M. Masmudi Martín, hemos descubierto que la estimulación con la proteína RGS-14 (que participa en la regulación de la señalización intracelular) de la corteza visual secundaria V2, una diminuta región cerebral, puede mejorar la memoria.

Los experimentos se realizaron con ratas, cuya memoria se midió mediante la prueba de reconocimiento de objetos. Los múridos que sobreexpresaban la proteína inyectada en V2 retuvieron la información de un objeto durante meses; los animales control, en cambio, fueron incapaces de almacenar la misma información durante más de 45 minutos. Asimismo, los animales inyectados con RGS-14 almacenaron el triple de información que los no inyectados. Las ratas sometidas al tratamiento recordaron múltiples objetos; los animales sin tratar, sólo dos.

La importancia del hallazgo, publicado en *Science* en julio de 2009, radica en la repercusión social de sus aplicaciones. La proteína RGS-14 podría convertirse en un fármaco que remediase las deficiencias en la memoria de ancianos y pacientes con patologías neurológicas o neurodegenerativas.

—M. F. López Aranda
Centro de Investigaciones Médico-Sanitarias, Málaga



LA MEMORIA DE UNA RATA se mide mediante la prueba de reconocimiento de objetos, que consta de dos fases. En la primera, el animal se familiariza con un espacio que contiene dos objetos idénticos. En la segunda, el animal se enfrenta al mismo espacio pero con uno de los dos objetos cambiado. Si el múrido recuerda el objeto "viejo", le dedicará menos tiempo que al "nuevo"; si no lo recuerda, mostrará el mismo interés por ambos objetos.

MEDIOAMBIENTE

Teflón: tan útil como peligroso

Aunque los alimentos no se peguen al teflón, éste sí se pega a nosotros. Las fábricas productoras de sartenes antiadherentes afectan al entorno y contaminan las aguas con ácido perfluorooctanoico, un subproducto. Este compuesto, que no es biodegradable, ha conseguido acceder al cuerpo de más del 95 por ciento de los habitantes de EE.UU. y, según la EPA, la Agencia de Protección Medioambiental de ese país, probablemente tenga efectos cancerígenos en los humanos. Otros estudios lo han relacionado con la infertilidad, trastornos inmunitarios y problemas de crecimiento prenatal. El teflón también puede causar problemas en la cocina: cuando supera los 270 grados centígrados (algo posible si se calienta una sartén vacía durante varios minutos) el recubrimiento se agrieta y libera vapores tóxicos.

El teflón ha provocado bastantes dolores de cabeza a DuPont, fabricante del recubrimiento. En 2005, la compañía fue multada con 16,5 millones de dólares (la mayor sanción administrativa jamás impuesta por la EPA) por ocultar resultados que demostraban que el ácido perfluorooctanoico estaba contaminando el agua potable en las inmediaciones de una fábrica de DuPont al oeste de Virginia, y que el compuesto atravesaba la placenta y pasaba de madre a hijo. Desde entonces, DuPont se ha comprometido a eliminar este producto químico del proceso de fabricación del teflón antes de 2015 y sustituirlo por productos alternativos biodegradables. Renee Sharp, del Grupo de Trabajo Medioambiental, un organismo de control sin ánimo de lucro, afirma que hay pocos datos disponibles: "No podemos estar seguros de que el producto que saldrá al mercado sea más seguro". —*Melinda Wenner Moyer*

GEOLOGIA

Breve historia de la tectónica de placas

La idea de una deriva continental fue postulada por Alfred Wegener y recogida en 1915 en su obra *El origen de los continentes y los océanos*. Aunque existían algunos indicios a su favor, en un principio la mayoría de los geólogos se mostraron escépticos, ya que no se conocía ningún mecanismo plausible que explicase el movimiento de grandes masas de tierra a través del océano.

El concepto moderno de placas tectónicas móviles fue propuesto en 1962 por Harry H. Hess, de la Universidad de Princeton. Hess había sido capitán de un carguero militar estadounidense durante la Segunda Guerra Mundial; durante sus viajes, había utilizado el sónar del barco para elaborar un mapa del fondo del Pacífico. Defendió la hipótesis de que la totalidad de la corteza terrestre, tanto la oceánica como la continental, se desplazaba sobre el manto como consecuencia de la convección en éste. La corteza se formaría en las dorsales oceánicas, lugares en los que emerge y solidifica el magma, y la corteza ya existente se hundiría en las fosas oceánicas en los procesos conocidos como subducción de placas.

Las ideas de Hess fueron aceptadas por la comunidad científica después de que algunos estudios hallasen que el magnetismo de las rocas del fondo marino se ajustaba a sus predicciones: el campo magnético terrestre, cuya polaridad se invierte cada cientos de miles de años, deja su huella en la roca a medida que ésta solidifica, lo que provoca la formación de bandas magnéticas alternas y paralelas a las dorsales oceánicas.

Así pues, la deriva continental tiene como origen las altas temperaturas del interior de la Tierra. Ese calor procede en parte de las desintegraciones radioactivas en su interior, pero también es un remanente de la formación del planeta. De hecho, se estima que, hace unos 3000 millones de años, el calor emergente debía ser el doble que en la actualidad. Ello ocasionaba numerosas erupciones de magma y fragmentaba la litosfera primitiva en múltiples placas de pequeño tamaño. Puede que los primeros continentes no fuesen mucho mayores que Islandia. Probablemente, también se pareciesen a la isla en otros aspectos: a lo largo de unos 16 millones de años, Islandia (*abajo*) se ha ido formando sobre uno de los puntos de acumulación de magma de la dorsal mesoatlántica. —*Graham P. Collins*



DORLING KINDERSLEY *Getty Images (sartén); Getty Images (montañas)*

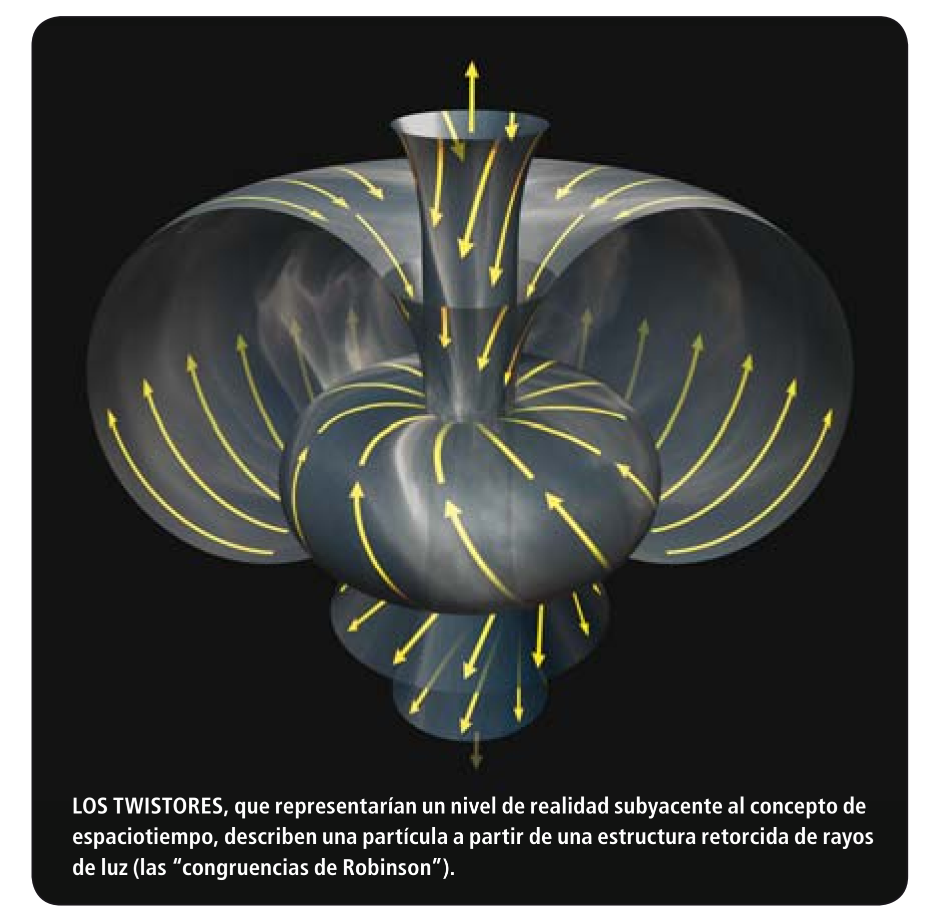
Twists del destino

La antigua idea de twistores de Roger Penrose desencadena una de las últimas revoluciones en teoría de cuerdas

A finales del decenio de los sesenta, Roger Penrose, físico y matemático de la Universidad de Oxford, concibió una idea completamente nueva para afrontar el reto de una teoría unificada. En lugar de intentar explicar el modo en que se mueven e interactúan las partículas *en* el espacio y el tiempo, propuso una descripción matemática en la que los puntos del espaciotiempo se convertían en una estructura secundaria, la cual emergía a partir de un nivel más profundo de la realidad, basado en una estructura matemática que Penrose denominó *álgebra de twistores.* Su teoría, sin embargo, no llegó a hacerse popular. Quedó estancada durante años, debido a un farragoso aparato matemático y a diversos problemas conceptuales.

Hace unos años, en octubre de 2003, Penrose acudió al Instituto de Estudios Avanzados (IAS) de Princeton, donde visitó a Edward Witten, uno de los más renombrados especialistas en teoría de cuerdas. Hoy por hoy, la teoría de cuerdas representa la apuesta mayoritaria de la comunidad científica para abordar la unificación de todas las interacciones, la gravedad y la mecánica cuántica. Penrose, conocido por no compartir ese punto de vista, quizá se sorprendiese al comprobar que Witten deseaba hablar con él de su olvidada teoría de twistores.

Meses después, Witten publicaba un denso artículo de 96 páginas en el que formulaba cierta teoría de cuerdas en el espacio de twistores de Penrose, al tiempo que relacionaba el modelo resultante con otros de física de partículas. El trabajo suscitó un considerable interés. A día de hoy, lleva acumulada una respetable cantidad de citas. Los físicos teóricos se han visto obligados a repensar la naturaleza del espaciotiempo. Aunque aún no han alcanzado sus ambiciosas metas, el formalismo propuesto por Witten ha servido para desarrollar técnicas de cálculo que reducen a simples consecuencias matemáticas algunas de las más complicadas relaciones de la física de partículas.



LOS TWISTORES, que representarían un nivel de realidad subyacente al concepto de espaciotiempo, describen una partícula a partir de una estructura retorcida de rayos de luz (las "congruencias de Robinson").

GEORGE RETSECK

"Nunca antes había sentido tanta emoción con ningún otro tema", afirma Nima Arkani-Hamed, teórico de cuerdas que se trasladó en fecha reciente al IAS desde la Universidad de Harvard para sumergirse en este nuevo campo. "Se está desarrollando a pasos agigantados, con un grupo de unas quince personas en todo el mundo que trabajan en ello constantemente."

Con anterioridad al trabajo de Witten, los expertos en twistores y en teoría de cuerdas se movían en círculos inconexos e incluso parecían hablar lenguajes diferentes. Mientras Penrose y sus acólitos han cosechado su fama gracias a sus estudios sobre la teoría de la relatividad general de Einstein, los expertos en teoría de cuerdas provienen del campo de la física de partículas. Lionel Mason, de la Universidad de Oxford, señala que, cuando Penrose y él visitaron en 1987 la Universidad de Siracusa, en Nueva York, dejaron de asistir a una charla sobre teoría de cuerdas que quizá les hubiera proporcionado los indicios que necesitaban. "No íbamos a los seminarios sobre física de partículas. Eramos relativistas", afirma.

El objetivo original de Penrose era reconsiderar la manera en que los principios de la mecánica cuántica habrían de aplicarse al espacio y al tiempo. Siempre se ha pensado que la geometría del espaciotiempo ha de fluctuar a escalas cuánticas. Sin embargo, esas fluctuaciones podrían afectar a las relaciones causales entre acontecimientos (provocar que un suceso que debería ser la causa de otro dejase de serlo) y generar las clásicas paradojas que encontramos en las historias sobre viajes en el tiempo.

En la teoría de twistores, las secuencias causales son primarias y no fluc-

túan (los twistores reciben su nombre del verbo inglés *twist*, “retorcer”, debido a la forma que adoptan las relaciones causales en torno a una partícula con espín —*véase la figura*—). En su lugar, lo que fluctúa es la posición espacial y temporal de un suceso. Sin embargo, los expertos en twistores no consiguieron llegar muy lejos con esta idea; al menos, hasta que los teóricos de cuerdas hicieron la observación de que un evento con una posición espaciotemporal deslocalizada viene a ser, en cierto modo, una cuerda.

Por su parte, los expertos en la teoría de cuerdas ya tenían sus propias ideas sobre las partículas, la gravedad y el espaciotiempo. En 1997, Juan Maldacena propuso una correspondencia matemática precisa entre cierta teoría de partículas (sin gravedad) en cuatro dimensiones y una teoría de cuerdas (con gravedad) en un espaciotiempo de diez dimensiones (con cinco dimensiones no compactas —“normales”— y cinco compactas —“enrolladas” o “escondidas”—) [*véase* “El espacio, ¿una ilusión?”, por J. Maldacena; Investigación y Ciencia, enero de 2006”]. Al igual que un holograma codifica en dos dimensiones información tridimensional, las cuerdas y la gravedad surgirían a partir de la información codificada por la física de partículas en un espaciotiempo de dimensión menor. La formulación de Witten de la teoría de cuerdas en el espacio de twistores es similar a la de Maldacena, ya que también describe cierto régimen de las interacciones entre partículas en términos de una teoría de cuerdas equivalente.

Es por ello por lo que, independientemente de su éxito a la hora de redefinir la noción de espaciotiempo, la teoría de cuerdas y los twistores han conseguido llamar la atención de los físicos de partículas. Muy a menudo, los cálculos asociados incluso a las colisiones más sencillas de partículas pueden llegar a ser tremendamente laboriosos. Para llevarlos a cabo se emplea una estrategia, ideada por Richard Feynman en el decenio de los cuarenta, que consiste en ordenar el cálculo en una serie de pasos que pueden representarse gráficamente con un conjunto de diagramas. En ocasiones, una gran cantidad de términos acaban por cancelarse unos a otros, pero no puede saberse con antelación cuáles se cancelarán y cuáles no, por lo que hay que calcular trabajosamente todos ellos.

Al relacionar las cuerdas, los twistores y la física de partículas, la formulación de Witten hace explícitas ciertas simetrías que no se aprecian en la expansión tradicional en diagramas de Feynman. Esas simetrías implican automáticamente las cancelaciones antes mencionadas, por lo que evitan desde el principio numerosas complejidades matemáticas innecesarias. Cálculos que antiguamente resultaban demasiado complejos incluso para los principales expertos en la materia pueden resolverse ahora en un par de semanas. “Estoy bastante seguro de que a Feynman le gustaría ver lo que podemos hacer”, afirma Zvi Bern, de la Universidad de California en Los Angeles.

¿Qué queda de las implicaciones de la teoría? La posibilidad de que el espaciotiempo sea un concepto derivado no es novedosa. Andrew Hodges, de Oxford, señala que no percibimos directamente el espaciotiempo, sino que deducimos que los sucesos ocurren en lugares específicos y en momentos concretos a partir de la información que recibimos. Insiste en que la idea de que los puntos del espaciotiempo son objetos primarios es artificial. En cualquier caso, lo que sí es cierto es que el concepto de posiciones y tiempos diferenciados no casa bien con la idea de una mecánica cuántica en el espaciotiempo curvo que describe la relatividad general.

Esta curiosa teoría del espaciotiempo está todavía en sus comienzos. Su extraordinaria complejidad matemática es tal que incluso los implicados directamente en su desarrollo admiten que les cuesta seguir los avances. Además, nadie ha conseguido explicar por qué el espaciotiempo nos parece tan real si, a la postre, se trata sólo de una estructura secundaria. ¿De dónde surgen entonces las nociones de tiempo y espacio tal y como nos es dado percibirlas? Es lícito pensar que, cualquiera que sea el proceso, no tendría por qué limitarse a las escalas subatómicas, ya que lo que ha de emerger es el mismo concepto de tamaño. Quizá debería manifestarse a cualquier escala y en cualquier lugar en torno a nosotros... siempre y cuando sepamos dónde buscarlo.

George Musser

La hipótesis del gradiente de estrés

O cómo varían las interacciones entre las plantas a lo largo de gradientes ambientales

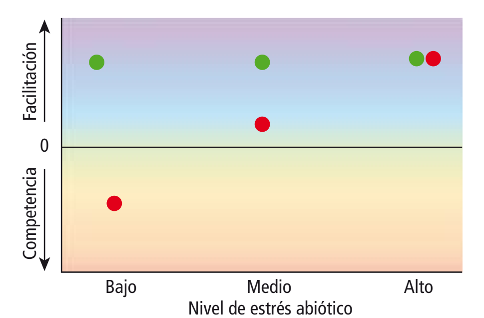
Pese a tener constancia desde hace casi cien años de la existencia de interacciones positivas o de facilitación entre plantas —que tienen lugar cuando individuos de una especie favorecen el establecimiento, crecimiento o desarrollo de individuos de la misma o de otras especies—, sólo desde hace unos veinte son objeto de verdadera atención por parte de los ecólogos vegetales. Los numerosos estudios realizados durante este tiempo han demostrado que dichas interacciones son ubicuas en la mayoría de los ecosistemas terrestres, y que resultan especialmente frecuentes en ambientes sometidos a condiciones ambientales estresantes, como las zonas semiáridas y de alta montaña. Las investigaciones han puesto también de manifiesto que la facilitación desempeña una importante función en el mantenimiento de la estructura y diversidad de los ecosistemas terrestres, en su restauración cuando se degradan y en los procesos de invasión por parte de especies exóticas, entre otros aspectos.

Es evidente que las plantas próximas entre sí, cuyas raíces y copas se hallan en contacto íntimo, compiten por los recursos como el agua, los nutrientes y la luz. No obstante, la presencia de plantas vecinas puede disminuir los efectos negativos de las condiciones ambientales extremas que encontramos en ciertos ecosistemas, en los semiáridos por ejemplo, mediante el sombreo, la acumulación de nutrientes, o la protección frente al viento o los herbívoros. La facilitación, pues, desempeña también una

VERSION REVISADA DE LA HIPOTESIS

La relación entre el efecto de las interacciones vegetales y el grado de estrés abiótico se describe mediante la hipótesis del gradiente de estrés. Estudios recientes proponen una versión revisada de este modelo, más compleja, que tiene en cuenta dos nuevos aspectos: el tipo de gradiente de estrés, que puede estar promovido por un recurso (agua, por ejemplo) u otro factor (temperatura), y la naturaleza de las especies que interactúan, que pueden ser tolerantes al estrés o competitivas. Las gráficas muestran las relaciones entre el nivel de estrés abiótico y el resultado de una interacción planta-planta, según se considere o no el efecto de los animales herbívoros.

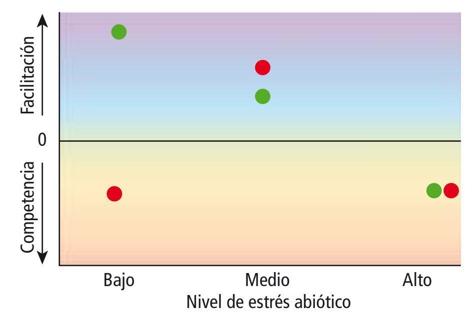
ESTRES ABIOTICO = NO PROMOVIDO POR UN RECURSO
ESPECIE NODRIZA = TOLERANTE AL ESTRES
ESPECIE PROTEGIDA = COMPETITIVA



En ausencia de herbívoros, la facilitación se acentúa conforme lo hace el estrés ambiental. La especie nodriza favorece a la protegida, porque mitiga en ella el efecto del estrés (aumenta la temperatura en zonas de alta montaña o disminuye el efecto desecante del viento, por ejemplo).

En presencia de herbívoros, la facilitación predomina a lo largo de todo el gradiente de estrés. Con un bajo nivel de estrés, las plantas que crecen junto a las nodrizas son más difícilmente consumidas por los herbívoros, sobre todo si estas últimas resultan poco apetecibles.

ESTRES ABIOTICO = PROMOVIDO POR UN RECURSO (AGUA)
ESPECIE NODRIZA = COMPETITIVA
ESPECIE PROTEGIDA = COMPETITIVA



En ausencia de herbívoros, la interacción entre plantas es negativa a niveles elevados y bajos de estrés, y positiva (facilitación) a niveles intermedios. Cuando el estrés es elevado, las mejores condiciones microclimáticas y el aumento de nutrientes que proporciona la especie nodriza a la protegida no compensan el efecto negativo derivado de la absorción de agua por la nodriza, que hace disminuir este recurso respecto a zonas adyacentes sin vegetación. Cuando el estrés es bajo, la disponibilidad de agua en estas zonas permite el desarrollo vegetal, por lo que aumenta la competencia entre ambas plantas por este recurso.

En presencia de herbívoros, la nodriza puede utilizar el exceso de recursos como el nitrógeno para sintetizar alcaloides que la defienden, a ella y a las especies protegidas, de ser consumidas por los animales. La producción de estos compuestos disminuye conforme crece el estrés, con el consiguiente aumento de la presión por los herbívoros. Ello, unido a la menor disponibilidad de recursos, hace que las plantas protegidas no experimenten ninguna ventaja al asociarse a una nodriza.

función potencialmente importante en la mitigación de los impactos del cambio climático en las especies vegetales de esos lugares.

En las zonas semiáridas de la península Ibérica, se prevé que el clima futuro estará caracterizado por una menor precipitación y un aumento de la temperatura, condiciones que elevarán el grado de estrés ambiental al que se hallan sometidos sus ecosistemas. De ahí que el análisis de la relación entre el efecto de las interacciones entre plantas vasculares y el grado de estrés abiótico resulte básico para conocer y predecir las implicaciones del cambio climático en la estructura y dinámica de las comunidades vegetales.

La relación entre las interacciones vegetales y el estrés ha sido el objeto de distintos modelos conceptuales. El más conocido e influyente corresponde a la hipótesis del gradiente de estrés (HGS, de aquí en adelante), propuesta por Mark Bertness, de la Universidad de Brown, y Ragan M. Callaway, de la Universidad de Montana, en 1994. Este modelo predice que la frecuencia relativa de la facilitación y la competencia variará de forma inversa a lo largo de gradientes de estrés ambiental o de herbivoría. Según la HGS, la facilitación debería ser particularmente común en comunidades que se desarrollan bajo un estrés abiótico elevado, presión por parte de los herbívoros o ambas cosas; cuando las condiciones ambientales son más benignas o esa presión disminuye, en cambio, las interacciones competitivas deberían dominar.

Desde la publicación de la HGS, se han llevado a cabo numerosos estudios para validar sus predicciones. Los resultados obtenidos hasta la fecha son contradictorios, ya que mientras muchos trabajos las apoyan, un número creciente de ellos no lo hacen. Buena parte de esta aparente contradicción puede deberse a los factores que no tiene en cuenta la HGS y al hecho de que la mayoría de los estudios realizados para comprobar la hipótesis sólo han evaluado la interacción entre un único par de especies, o unos pocos pares como mucho, lo que impide establecer generalizaciones sobre la frecuencia de las interacciones positivas.

Así, algunas investigaciones recientes han demostrado que los resultados obtenidos en un mismo ecosistema pueden variar en función de la aproximación experimental utilizada, que la facilitación puede no ser aparente bajo condiciones de estrés ambiental extremo, que la magnitud y dirección de las interacciones planta-planta puede cambiar a lo largo de la vida de las especies y que la transición entre las interacciones competitivas o facilitativas se ve afectada por las características de las especies, la naturaleza del estrés ambiental que se considere e incluso las variables utilizadas para medir la respuesta de las plantas.

Las discrepancias encontradas ponen de manifiesto la necesidad de desarrollar nuevos marcos conceptuales con una mayor capacidad predictiva que la HGS. A tal fin, en los últimos años se han propuesto distintas modificaciones de la hipótesis que incorporan los avances realizados desde su formulación. Entre ellas, las más importantes derivan de dos

trabajos publicados en *Journal of Ecology* en 2009. En el primero de ellos, elaborado por el autor, Ragan M. Callaway, Fernando Valladares, del Centro de Ciencias Medioambientales del CSIC, y Chris Lortie de la Universidad de York (Canadá), se plantea una nueva versión de la HGS, la "HGS revisada", para predecir la magnitud y dirección de las interacciones entre pares de especies a lo largo de gradientes de estrés abiótico. La principal novedad de este trabajo reside en la consideración explícita del tipo de estrés abiótico (provocado por la escasez de un recurso, como el agua, y por factores que no representan un recurso para las plantas, como la temperatura) y de los atributos de las plantas que están interactuando (la tolerancia al estrés y la capacidad competitiva).



ESPARTAL TIPICO SEMIARIDO en los alrededores de Ontígola (Madrid). En este ecosistema se ha documentando la prevalencia de interacciones positivas entre plantas.

Esa consideración hace que las interacciones no varíen siempre igual ante los incrementos del nivel de estrés. Así, el patrón general previsto por la HGS se cumpliría cuando la especie "facilitadora" o "nodriza" fuera tolerante al estrés y la "facilitada" o "protegida", competitiva. Por el contrario, cuando las dos especies que interactúan posean características similares (por ejemplo, ambas sean tolerantes al estrés o sean fundamentalmente competitivas) y el principal factor de estrés represente un recurso (como el agua), el resultado de una interacción dada será en su mayoría negativo, tanto a niveles bajos como altos de estrés ambiental.

La segunda aportación digna de mención ha sido realizada hace poco por el grupo de Chris Smit, de la Universidad de Utrecht, al evaluar el efecto de los herbívoros sobre las predicciones de la HGS revisada. Así, en presencia de animales herbívoros, algunas de las predicciones de la hipótesis se ven alteradas notablemente.

Las modificaciones propuestas de la HGS no son definitivas, pero suponen una contribución importante al marco teórico de las interacciones planta-planta y abren la puerta a la elaboración de modelos teóricos y analíticos más realistas y complejos. Asimismo, los modelos conceptuales como los revisados en el presente artículo constituyen un gran estímulo a la investigación en este campo. Suponen un avance en la evaluación de los efectos del cambio climático sobre las interacciones planta-planta y sobre el mantenimiento de la estructura y funcionamiento de las comunidades vegetales.

Fernando Tomás Maestre Gil
Departamento de Biología y Geología
Area de Biodiversidad y Conservación
Universidad Rey Juan Carlos, Madrid

Hormigas cultivadoras de hongos

Estos insectos sociales han desarrollado sistemas de "agricultura" y "salud pública" que guardan semejanza con los de las sociedades humanas

La domesticación de plantas y animales hace más de 10.000 años significó un cambio profundo para los humanos: permitió el desarrollo de sociedades de mayor tamaño y complejidad. En 1928, Alexander Fleming puso en marcha otra revolución: con su descubrimiento de los antibióticos, añadió una poderosa arma al arsenal de salud pública para el control de enfermedades infecciosas. Desde entonces, la agricultura y los antibióticos se han constituido en pilares de las sociedades contemporáneas.

La agricultura y los antibióticos son también los pilares de algunas de las más espectaculares sociedades de insectos sociales, entre ellas las hormigas cultivadoras de hongos, pertenecientes a la tribu Attini del Nuevo Mundo. Estas hormigas "descubrieron" la agricultura y los antibióticos mucho antes que los humanos: por lo menos sesenta millones de años antes. Han establecido una asociación cooperativa con un hongo que han domesticado y que cultivan como alimento para sus crías.

En el transcurso de la domesticación, el hongo cultivado sufrió dos cambios drásticos: la pérdida de la capacidad para sobrevivir en ausencia de las hormigas —y viceversa—, y la pérdida de reproducción sexual. A cambio, las hormigas desarrollaron un riguroso sistema "sanitario" para combatir y prevenir los patógenos que afectan al hongo cultivado y a los miembros de su sociedad. En su lucha, las hormigas han establecido una asociación cooperativa con bacterias filamentosas (Actinomycetes), que son cultivadas como fuente de antibióticos.

"Agricultura"

Las hormigas Attini son abundantes y diversas en el Neotrópico. Hay más de 250 especies. Cada una recolecta distintos materiales (hojas, restos vegetales y orgánicos, o heces de insectos) sobre los que cultiva el hongo. Desempeñan una importante función ecológica porque ciertas especies consumen enormes cantidades de biomasa vegetal y constituyen una plaga extraordinaria de los sistemas agrícolas.

Estas hormigas cultivan un solo tipo de hongo por nido. Practican el "monocultivo". Para establecer una nueva colonia, las reinas nuevas salen del nido materno con un propágulo del hongo, lo cual les permite desarrollar el mismo cultivo. Los monocultivos entrañan riesgo porque son altamente vulnerables a patógenos que pueden destruir una cosecha entera, algo que los humanos saben por experiencia propia.

"Salud pública"

Los insectos sociales (abejas melíferas, termitas, hormigas) presentan cuatro características que favorecen la propagación de enfermedades: viven en grupos sociales complejos de entre decenas y millones de individuos; las colonias presentan una alta densidad de individuos, pertenecientes a la misma familia, por lo que son bastante homogéneas en términos de relaciones genéticas; muestran una elevada tasa de contacto social; y ubican sus nidos en sitios oscuros y húmedos, condiciones que favorecen el crecimiento de hongos y bacterias. Así, lo mismo que otros animales sociales, las hormigas requieren de robustas estrategias para la gestión de su sistema de "salud pública".

La supervivencia de los nidos nuevos resulta crítica. Las reinas de linajes diferentes emplean estrategias higiénicas distintas. Una de las estrategias, la más ancestral, consiste en usar plataformas (alas desprendidas de las hormigas o raíces de plantas) donde se cultiva el propágulo, manteniéndolo así alejado de los contaminantes del suelo, del mismo modo que los humanos no comemos en el suelo, sino que solemos usar una mesa para ello. Mientras tanto, cada reina "forrajea" en busca de materiales orgánicos para sostener a sus crías. Cuando accede al nido, la reina presta una gran atención a la limpieza para disminuir la entrada de patógenos. En la otra estrategia, más evolucionada, la reina sella el nido después de construir la cámara (de crianza) y no forrajea por sustrato, sino que usa las reservas de su cuerpo para sostener a las crías, con lo que elimina la entrada de patógenos al nido durante esta etapa crítica.

Conforme crece la colonia, aumenta el número de individuos que entran al nido, lo cual podría facilitar la entrada de patógenos. Si los patógenos eluden los mecanismos defensivos de las hormigas, sus jardines de hongos pueden ser destruidos, dejándolas sin comida.



1. FILA DE HORMIGAS CULTIVADORAS DE HONGOS (*Atta colombica*) que transportan hacia el nido pedacitos de hojas y otros materiales. En el trozo de papel se ha posado una mosca parásita que ha puesto un huevo en la cabeza de la hormiga; la larva de la mosca se come la cabeza de la hormiga (*inserto*).

CORTESIA DE © DONNA CONLON

La práctica higiénica de lavarnos las manos, periódicamente y antes de comer, constituye una de las mejores vías para prevenir infecciones. Las hormigas muestran la misma conducta. Antes de entrar al nido, limpian cuidadosamente su cuerpo y el material forrajeado. Remueven partículas de la superficie y aplican sustancias antimicrobianas que ellas mismas secretan, las cuales eliminan entre el 75 y el 90 por ciento de los microorganismos que traen al entrar al nido.

Aunque la diversidad de patógenos es elevada (se incluyen otros hongos y bacterias generalistas), destaca un hongo especialista (*Escovopsis*), que ataca a los hongos cultivados. En algunos linajes, las hormigas cultivan bacterias actinomicetes y usan sus productos metabólicos antibióticos para el control específico de *Escovopsis*. Muchos de nuestros antibióticos (tetraciclinas y lincomicinas) también provienen de actinomicetes.

Las sociedades modernas se esfuerzan por mantener sus sistemas de salud pública, al tiempo que controlan o reducen los gastos médicos. También las hormigas se enfrentan a este problema. La síntesis de sustancias antimicrobianas en las glándulas de las hormigas es muy costosa, al igual que el cultivo de actinomicetes. En promedio, cada línea de defensa representa casi el 20 por ciento de la energía metabólica de la hormiga. Por esta razón, las hormigas han desarrollado estrategias que minimizan estos gastos. Ciertos linajes de hormigas con sociedades de gran tamaño, parece que han abandonado o reducido su mutualismo con los actinomicetes, en favor de un cóctel de secreciones antimicrobianas glandulares de amplio espectro combinado con una serie de actividades físicas para sacar los contaminantes fuera del nido; con ello habrían sustituido un sistema basado en antibióticos de bajo espectro por otro que emplea antibióticos de amplio espectro. Los humanos utilizamos antibióticos de amplio espectro cuando desconocemos el patógeno o a modo de profilaxis; el de bajo espectro, cuando conocemos el agente causante de la enfermedad.


2. LA HORMIGA DE LA IZQUIERDA, que cultiva bacterias (Actinomycetes, *gris* y *blanco*), está limpiando las patas de otra hormiga que ha regresado de forrajear.

CORTESIA DE LOS AUTORES

Hermógenes Fernández Marín
y **William T. Wcislo**
Instituto Smithsoniano
de Investigaciones Tropicales,
Panamá

Colisión de filosofías

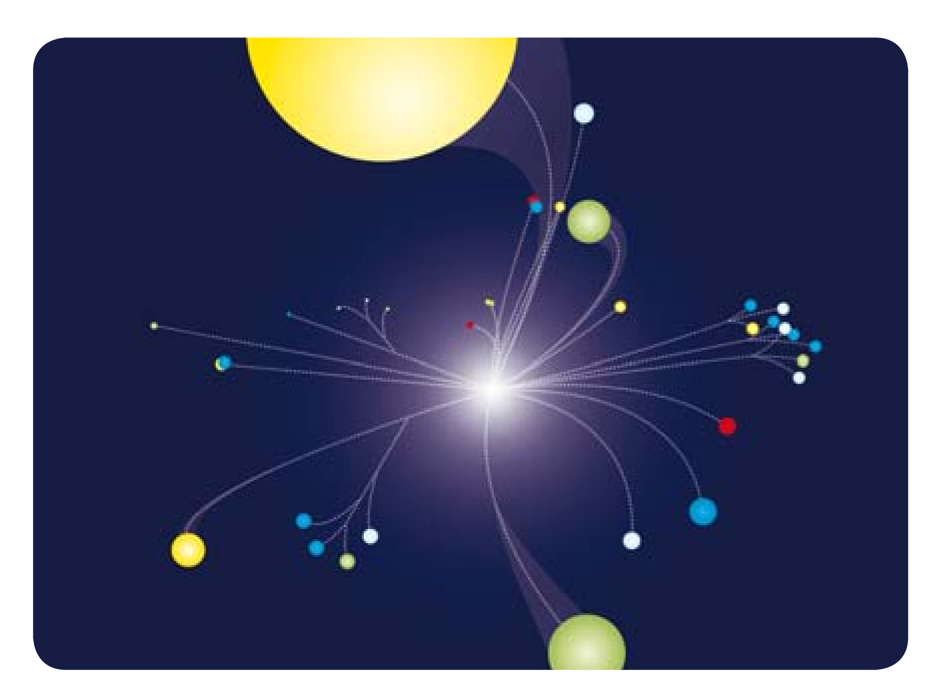
Una nueva forma de rebuscar partículas en los residuos de un acelerador

Tras un primer intento fallido a finales de 2008, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, en Ginebra, inició sus operaciones en diciembre de 2009. No sabemos si el LHC terminará o no por escupir materia oscura, agujeros negros microscópicos u otros resultados exóticos. Pero, en cualquier caso, determinar qué será exactamente lo que se obtenga será una tarea harto difícil. A este respecto, existe actualmente un controvertido debate acerca de cómo interpretar los futuros datos.

El LHC y otros aceleradores, como el Tevatrón, del Fermilab, en Batavia (Illinois), impulsan protones y otras partículas hasta una velocidad cercana a la de la luz y luego las hacen chocar. Gracias a la fórmula $E = mc^2$ de Einstein, parte de la energía de la colisión se convierte en partículas "exóticas" que, casi inmediatamente, se descomponen para formar cientos de partículas más conocidas. Los enormes detectores del LHC registrarán el paso de estos residuos, recogiendo datos a una velocidad asombrosa, equivalente a un CD-ROM por segundo.

Los físicos rebuscarán entre la información para encontrar combinaciones particulares de los productos de la desintegración que sugieran que se ha creado una nueva partícula. Buscarán indicios del bosón de Higgs, una partícula perseguida durante largo tiempo y que, supuestamente, confiere su masa a las demás partículas. Irán también al encuentro de partículas enteramente nuevas que permitan vislumbrar las leyes de la física a energías superiores.

Algunos, sin embargo, temen que, con ese enfoque tradicional, que vendría a



EL PUNTO DE COLISION en los experimentos en un acelerador es aquel en donde surgen las nuevas partículas. Una técnica novedosa podría descubrir partículas no incluidas en las predicciones.

ser como aplicar un algoritmo informático que buscara en un texto las letras H-I-G-G-S, podrían pasar inadvertidas algunas signaturas nuevas e interesantes que no hubieran sido previstas. En el Fermilab, Bruce Knuteson y Stephen Mrenna han defendido durante los últimos años un enfoque más general, denominado "búsqueda global". En lugar de buscar signaturas concretas, han desarrollado un *software* que analiza todos los datos y los compara con predicciones del modelo estándar, que incluye las leyes conocidas de la física de partículas. El software señala cualquier desviación del modelo estándar como una posible nueva partícula. En cierto modo, es como tener un algoritmo que, en lugar de buscar una palabra en particular dentro de un texto, compara cada palabra con el diccionario de palabras conocidas y señala las que suenan como si correspondiesen a otro idioma.

Para reducir los falsos positivos (algunas veces las partículas conocidas interactúan y simulan el comportamiento de otras partículas más interesantes), los físicos establecen un umbral para el mínimo número de veces que debe producirse un suceso exótico antes de alertar a los experimentadores de un posible nuevo hallazgo.

Knuteson, Mrenna y sus colaboradores pusieron en práctica su método con información antigua del Tevatrón. En principio, existía la posibilidad de hallar partículas exóticas en datos que no habían sido analizados por las búsquedas dirigidas. El equipo no encontró nada estadísticamente relevante, así que no anunciaron nuevos descubrimientos. Pero su esfuerzo mostró, al menos, que las búsquedas globales no producen necesariamente muchos falsos positivos, como algunos físicos temían.

Louis Lyons, de la Universidad de Oxford, afirma que la estadística utilizada por el equipo era correcta. En cambio, Pekka Sinervo, de la Universidad de Toronto, que ha participado en experimentos en el Tevatrón y en el LHC, sigue sin estar convencido. En su opinión, los autores tuvieron que "esconder bajo la alfombra" un gran número de fenómenos incomprendidos, en lugar de estudiarlos. Con ello quiere decir que la búsqueda generó abundantes datos de difícil interpretación. Aun así, las búsquedas globales podrían tener cierta utilidad, siempre que no distraigan a los investigadores de búsquedas restringidas a fenómenos específicos. Sinervo duda de que pudiera utilizarse una búsqueda de ese tipo para un descubrimiento temprano en el LHC.

Quizá tenga razón, señala Sascha Caron, de la Universidad de Friburgo, pero, aun así, una gran parte de los físicos contempla con interés la idea de búsquedas globales desde que Knuteson la propusiera a comienzos de este decenio. Caron y sus colaboradores han desarrollado su propio *software* para lo que ellos denominan "búsquedas generales" mientras trabajan en un experimento en el laboratorio DESY, en Hamburgo; planean hacer lo mismo en el LHC.

Según Mrena, la experiencia con el Tevatrón muestra también que las búsquedas globales ayudarían a los físicos a interpretar los datos (por ejemplo, en lo relativo a la reacción de los detectores ante diversas partículas). Los equipos no suelen comparar sus hipótesis, así que sus suposiciones podrían ser contradictorias. "Si uno lo considera todo, todo debe tener sentido", afirma Mrena.

Davide Castelvecchi

Demasiados, demasiado pocos

La relación entre el número variable de copias de genes y las enfermedades

Se publicó el primer borrador del genoma humano hace casi diez años, pero la búsqueda de los genes que provocan enfermedades aún no ha concluido. La mayoría de los investigadores se ha centrado en cambios únicos en los pares de bases (AT y CG) que codifican el genoma en el ADN. Algunas enfermedades letales, como la fibrosis quística, se deben a alteraciones así. Pero esas mutaciones entre los tres mil millones de pares de bases del genoma apenas constituyen una parte del problema. Hace poco se ha estudiado una aberración genética que solía considerarse muy



poco frecuente: la variación en el número de copias (VNC). En ella, el genoma es perfectamente normal, salvo por la falta o la repetición de ciertas secuencias de pares de bases; ese hecho quizá resulte determinante en enfermedades que no se ajustan a modelos genéticos sencillos, como el autismo, la esquizofrenia y la enfermedad de Crohn, cuyas causas han dejado sin respuesta a los investigadores durante decenios.

Calvin Bridges descubrió la variación en el número de copias en 1936, cuando se dio cuenta de que las moscas que heredaban un duplicado del gen *Bar* presentaban ojos muy pequeños. Dos décadas después, se identificó la VNC como la causa del síndrome de Down: los afectados heredaban una copia adicional del cromosoma 21. Aparentemente, la VNC era poco frecuente y constituía siempre una causa inequívoca de las enfermedades.

En 2004, sin embargo, se realizaron avances notables. Dos grupos de investigación publicaron los primeros mapas de VNC de todo el genoma, que ilustraban que la variación en el número de genes era, en realidad, bastante común: cada grupo encontró unos desequilibrios de unas doce copias por persona. "Cuando esos estudios salieron a la luz, supusieron una revolución", afirma Stephen Scherer, del Hospital Infantil de Toronto y coautor de uno de los estudios. "Se pensaba que esas alteraciones notables en el ADN siempre se asociaban a enfermedades."

En 2006, el grupo de Scherer, del que formaba parte el experto en genética de poblaciones Matthew Hurles, del Instituto Wellcome Trust Sanger de Cambridge, procedió a estudiar la VNC a mayor resolución. Analizó el ADN de 270 individuos e identificó una media de 47 variaciones en el número de copias en cada persona. En 2007, los investigadores secuenciaron el genoma de J. Craig Venter, pionero de la secuenciación del genoma humano: encontraron 62 variaciones en el número de copias. Está claro, afirma Hurles, que "poseer un genoma perfecto no es lo habitual".

Se sigue intentando descifrar el efecto de esas variaciones en el organismo, la mayoría de ellas heredadas. Por lo general, si un genoma presenta tres copias de un gen en lugar de las dos copias habituales (una de cada progenitor), la célula sintetizará proteínas a partir de las tres copias, con lo que producirá más



EQUINOX GRAPHICS *Photo Researchers, Inc.*

JUEGO DE NUMEROS EN LOS CROMOSOMAS. Las secuencias de ADN ausentes o sobrantes, que se han vinculado con diversas enfermedades, han resultado ser más comunes de lo que se pensaba.

proteínas de las que necesita. "Sin embargo, hay excepciones a esa regla", afirma Scherer. Algunas veces, las células siguen produciendo la cantidad correcta; en otras ocasiones, la VNC afecta a regiones del ADN que regulan a su vez la expresión de otros genes, lo que complica aún más el problema.

Aun así, los científicos han vinculado las VNC a varias enfermedades complejas. Un estudio publicado en *Nature* en septiembre de 2008 corroboró algunos hallazgos anteriores que indicaban que un 30 por ciento de las personas con una carencia de tres millones de pares de bases en una región del cromosoma 22 sufrían dolencias psiquiátricas, como el autismo o la esquizofrenia. Un estudio publicado en agosto de 2008 en *Nature Genetics* reveló una vinculación entre la enfermedad de Crohn y la ausencia de 20.000 pares de bases en una región del gen *IRGM*, que interviene en la respuesta frente a las bacterias invasoras.

En enero de 2009, apareció un artículo en *Nature Genetics* que describía una asociación entre un índice de masa corporal elevado y la ausencia de 45.000 pares de bases en el gen *NEGR1*; esa carencia afectaba al crecimiento neuronal en el hipotálamo, una región del cerebro que regula el hambre y el metabolismo. "La avalancha de datos es tan grande y diversa que es difícil mantenerse al día", señala Edwin Cook, Jr., psiquiatra de la Universidad de Illinois en Chicago.

La variación del número de copias podría ayudar a explicar la herencia de las enfermedades complejas aunque éstas no se asocien siempre a los mismos genes. Según Steven McCarroll, experto en genética de poblaciones del Instituto Tecnológico de Massachusetts y coautor del estudio sobre la enfermedad de Crohn, la variación modificaría el riesgo de forma probabilística. "La eliminación en *IRGM* aumentaría el riesgo de padecer la enfermedad de Crohn en sólo un 40 por ciento, pero afectaría a millones de personas", explica. El hecho de que una persona contraiga o no la enfermedad dependería de factores adicionales de tipo genético o ambiental.

Mientras se siguen investigando nuevos vínculos entre VNC conocidas y ciertas enfermedades, Scherer y Hurles se dedican a examinar nuevas variantes. Su mapa del año 2006 sólo identificaba las VNC de un tamaño de 20.000 pares de bases; ahora están terminando un mapa revisado que incluye variantes con tan sólo 500 pares de bases. El análisis sugiere que, en cada persona, existen unas mil variaciones del número de copias, lo que representa al menos un uno por ciento del genoma.

"Hemos llegado muy lejos y muy deprisa", comenta Scherer. Sin embargo, "a lo largo del próximo año vamos a descubrir VNC más pequeñas y VNC más comunes asociadas a diversas enfermedades."

Melinda Wenner Moyer

EXOPLANETAS HABITABLES

La galaxia se encuentra repleta de planetas. ¿Cómo son? Los modelos teóricos indican que podría haber un gran número de exoplanetas similares a la Tierra. Quizá muchos de ellos alberguen vida

DIMITAR D. SASSELOV Y DIANA VALENCIA

Imaginémonos disfrutando del cielo de una noche de verano. Nos encontramos mirando hacia una estrella concreta, en torno a la cual hemos oído que orbita un planeta algo peculiar: es varias veces mayor que la Tierra y, al igual que ésta, se compone sobre todo de roca. Los seísmos sacuden en ocasiones su superficie, gran parte de la cual se encuentra cubierta por océanos. Su atmósfera no es muy diferente de la que respiramos; de hecho, los astrónomos piensan que podría albergar vida.

La escena anterior quizá se convierta en una realidad durante la próxima década. Si bien la mayoría de los 490 planetas extrasolares descubiertos hasta la fecha son gigantes gaseosos similares a Júpiter, algunos de ellos quizá no sean tan diferentes de la Tierra. En breve, la sonda Kepler, de la NASA, un buscador de planetas enviado al espacio el año pasado, descubrirá muchos más.

Por supuesto, tales mundos se hallan a años luz de distancia, por lo que ni siquiera nuestros instrumentos más avanzados logran observar los detalles de su superficie. Lo máximo que pueden hacer nuestros telescopios es detectar signos indirectos de la presencia de un planeta y, a partir de ellos, obtener algunos datos que permitan estimar su masa y el radio de su órbita. En ciertos casos también nos proporcionan información sobre el diámetro del planeta y otras características. En lo referente a los exoplanetas gigantes, resulta posible inferir detalles sobre la composición y la dinámica de su atmósfera.

RON MILLER

CONCEPTOS BASICOS

- En breve, el número de planetas extrasolares conocidos aumentará de manera espectacular gracias a un nuevo observatorio espacial.
- Según los modelos teóricos, los planetas rocosos mayores que la Tierra quizá cuenten con una geología activa y climas y atmósferas estables.
- Algunas de esas "supertierras" podrían albergar vida.



LOS PLANETAS EXTRASOLARES descubiertos hasta la fecha son en su mayoría gigantes gaseosos similares a Júpiter (*en esta representación artística, arriba y abajo*). Sin embargo, en los últimos años se han hallado planetas de menor tamaño que parecerían versiones ampliadas de la Tierra. Otros podrían ser planetas cubiertos por agua.

Es posible deducir un gran número de detalles de un planeta lejano a partir de unos pocos datos

Algo muchísimo más difícil es medir de manera directa propiedades referentes a la geología o la química de un planeta. Sin embargo, es posible confeccionar retratos bastante complejos de un planeta lejano a partir de unos pocos datos. Ello se consigue mediante la combinación de modelos teóricos, simulaciones por ordenador y experimentos de laboratorio con lo que ya sabemos sobre la Tierra y los demás planetas del sistema solar.

En nuestras investigaciones hemos modelizado la dinámica de planetas con una composición parecida a la de la Tierra. Hemos hallado que tales planetas, aun cuando sean mucho mayores que el nuestro, deberían exhibir una geofísica activa y una atmósfera y un clima que, a menudo, quizá sean los adecuados para albergar vida. De hecho, la Tierra parece encontrarse en el límite inferior del intervalo de masas planetarias que hacen posible la aparición de vida. En otras palabras: de haber sido menor, es probable que la Tierra hubiese resultado tan estéril como Marte o Venus.

Las primeras supertierras

Los primeros hallazgos de planetas extrasolares tuvieron lugar a mediados de los noventa del siglo pasado. La mayoría de las detecciones se basaron en el ligero movimiento de vaivén que experimenta una estrella en torno a la cual gira un planeta. La estrella también recorre una pequeña órbita en torno al centro de masas del conjunto, y semejante movimiento puede detectarse gracias al desplazamiento Doppler de la luz emitida por la estrella.

En un principio, algunos astrónomos se preguntaron si aquellos vaivenes podían deberse a la física intrínseca de la estrella. Ello fue lo que provocó que uno de los autores (Sasselov) se interesase por el fenómeno. Su especialidad eran las estrellas pulsantes, las que muestran cambios periódicos en la luz que emiten. El trabajo de Sasselov sirvió para demostrar que el tipo de oscilaciones observadas sólo podía tener como origen la existencia de planetas en torno a la estrella. Desde entonces, los astrofísicos cuentan con una poderosa herramienta para descubrir nuevos planetas.

Después, Sasselov pasó a formar parte del grupo de expertos que propuso la construcción del observatorio espacial Kepler para la búsqueda de exoplanetas, el cual entró en órbita en 2009. Se diseñó para descubrir planetas a partir de la detección de pequeñas caídas en la luminosidad de la estrella (en un caso típico, de pocas horas de duración). Si tales caídas se suceden en intervalos regulares, significa que hay un planeta que de manera periódica pasa por delante de la estrella. El telescopio apunta a una región concreta del cielo, próxima a la constelación del Cisne, y su cámara digital de gran angular monitorizará unas 150.000 estrellas durante tres años. Una vez reunidos los datos suficientes, se espera que Kepler descu-

ALGUNOS PLANETAS NOTABLES

Ya que los planetas de gran tamaño son más fáciles de detectar que los pequeños, la mayoría de los planetas conocidos hoy día (490 en el momento de imprimir este artículo) son de enormes proporciones, hasta ocho veces más masivos que Júpiter (1 masa joviana = 300 masas terrestres; 1 radio joviano = 11,3 radios terrestres). En la mayoría de los casos, no resulta posible medir su radio, pero sí determinar su masa y el tamaño de su órbita. En algunos casos se conocen los radios, incluidos los de dos planetas relativamente pequeños: GJ 1214b y COROT-7b.



RON MILLER (*planetas*)

bra cientos de planetas, algunos de ellos tan pequeños como la Tierra.

Ya durante los preparativos de la misión, Sasselov se percató de que, si bien Kepler quizá recabase gran cantidad de información, no quedaba claro que los expertos supiesen qué hacer con ella. Para su sorpresa, descubrió que nadie había intentado modelizar los procesos geológicos de un planeta similar a la Tierra pero de mayor tamaño. De esta manera inició una colaboración con Richard O'Connell, profesor en Harvard y experto en geofísica.

Por aquel entonces, la otra autora de este artículo (Valencia) había comenzado su tesis doctoral en geofísica en la Universidad de Harvad, donde asistía a las clases de geodinámica impartidas por O'Connell. Este, motivado por una conversación con Sasselov, había pedido a sus alumnos que calculasen cuánto cambiaría el tamaño de la Tierra si su masa fuese mayor. ¿Cuánto se contraería su interior como consecuencia de una mayor fuerza de gravedad? La pregunta sedujo a Valencia de tal modo que decidió reorientar su carrera investigadora.

En nuestro sistema solar, la Tierra es el mayor de los planetas rocosos. Quizá por ello los expertos no acostumbraban a pensar en "supertierras" (planetas con una composición similar a la Tierra pero con una masa mucho mayor). Este campo de estudio resultó tan novedoso que, cuando los autores enviaron el primer artículo científico sobre supertierras para su publicación en 2004, los editores de la revista necesitaron casi un año para encontrar expertos con los conocimientos adecuados para supervisar su trabajo. De hecho, no fueron pocos los expertos en exoplanetas

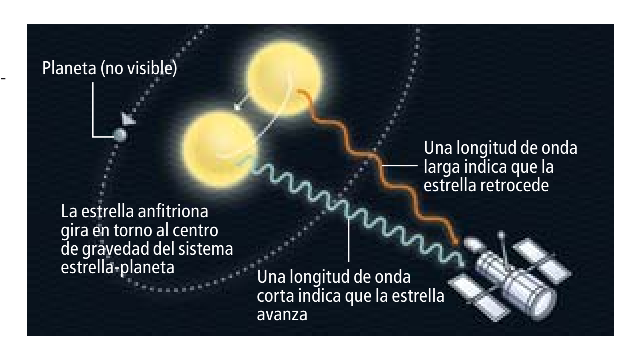
PETER Y MARIA HOEY

COMO ENCONTRAR UN PLANETA

En comparación con la estrella anfitriona, un planeta supone una fuente luminosa muy débil. Por ello son muy pocos los planetas extrasolares que han sido observados de manera directa (identificados como un punto de luz ajeno a su estrella). En algunos casos se han detectado los colores de los planetas mezclados con los de la estrella anfitriona. Todos los demás exoplanetas se han descubierto indirectamente, por regla general mediante la aplicación de las técnicas de vaivén y la de los tránsitos.

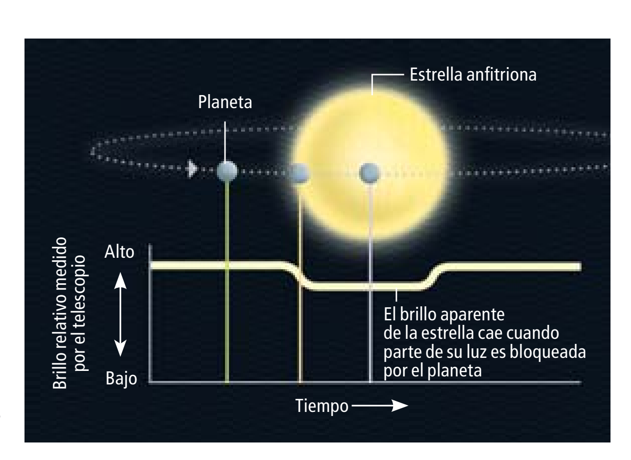
METODO DEL VAIVEN

La gravedad del planeta provoca que la estrella anfitriona gire levemente. Mediante el análisis del espectro de la luz estelar (efecto Doppler), se miden cambios en la velocidad de la estrella relativa a la Tierra en cantidades tan minúsculas como 1 metro por segundo. Las variaciones periódicas revelan la presencia del planeta.



METODO DEL TRANSITO

Si la órbita del planeta cruza la línea de visión entre su estrella anfitriona y la Tierra, eclipsará en cierta medida la luz recibida de la estrella. Un planeta del tamaño de Júpiter eclipsa a su estrella en apenas un 1 por ciento; un planeta del tamaño de la Tierra, en un 0,01 por ciento. El nuevo telescopio espacial Kepler cuenta con la tecnología necesaria para detectar dichos cambios (*véase el recuadro* "Atentos a 150.000 soles").



PLANETA: HD 149026b
TIPO: Gigante gaseoso
DESCUBIERTO EN: 2005
MASA: 0,36 masas jovianas
RADIO: 0,65 radios jovianos
PERIODO ORBITAL: 69 horas
CARACTERISTICAS: El planeta gigante más denso conocido. Orbita tan cerca de su estrella que su temperatura superficial podría superar los 2300 kelvin.

PLANETA: Osiris (HD 209458b)
TIPO: Gigante gaseoso
DESCUBIERTO EN: 1999
MASA: 0,69 masas jovianas
RADIO: 1,32 radios jovianos
PERIODO ORBITAL: 3,5 días
CARACTERISTICAS: Uno de los pocos planetas cuyos colores han sido detectados a partir del espectro de la estrella anfitriona. Su espectro revela la presencia de oxígeno y carbono en la atmósfera. La teoría sugiere que también existe vapor de agua.

PLANETA: Fomalhaut b
TIPO: Gigante gaseoso
DESCUBIERTO EN: 2008
MASA: Entre 0,5 y 3 masas jovianas
RADIO: 1 radio joviano (?)
PERIODO ORBITAL: 872 años
CARACTERISTICAS: Uno de los poquísimos planetas (y, en general, el objeto de menor masa) que se ha detectado de manera directa fuera del sistema solar.

que se mostraron sorprendidos ante semejante línea de investigación. Los únicos exoplanetas conocidos entonces eran gigantes gaseosos similares a Júpiter, no supertierras. ¿Por qué molestarse en estudiar planetas que quizá no existiesen?

Sin embargo, en 2005, el grupo de Eugenio Rivera, de la Universidad de California en Santa Cruz, detectó un movimiento de vaivén en la estrella Gliese 876, en la constelación de Acuario. Ello demostraba la existencia de un planeta orbitando a su alrededor. Se trataba de la primera supertierra conocida.

Sabemos que el planeta, llamado GJ 876d, tarda dos días en completar una vuelta en torno a su estrella y que su masa es apenas 7,5 veces la de la Tierra. Pero ahí acaba todo lo que podemos decir de él. Al no contar con ningún método para medir su radio, no podemos calcular su densidad media ni, por tanto, estimar su composición.

El método de los tránsitos planetarios, sin embargo, sí permite obtener información sobre el tamaño, ya que la cantidad de luz estelar ocultada por el planeta proporciona una medida de su diámetro. Si, además, se mide el vaivén de la estrella, sabremos la masa del planeta. Con ambos datos ya es posible calcular la densidad media. Si ésta es alta, del orden de la de una piedra, el planeta bien podría ser rocoso.

La primera supertierra detectada mediante el método de los tránsitos, COROT-7b, fue descubierta a principios de 2009 por el telescopio espacial COROT, un predecesor de Kepler. La densidad de COROT-7b es tan alta que no queda duda de que se trata de un planeta rocoso. El planeta se halla tan cerca de su estrella —tarda menos de un día terrestre en completar una vuelta— que la superficie del lado diurno debe encontrarse fundida. (Los planetas con órbitas muy cortas presentan siempre la misma cara a la estrella, igual que nuestra Luna con respecto a la Tierra.) Unos 10 meses después, un proyecto llevado a cabo con observatorios terrestres y liderado por David Charbonneau, del Centro Harvard-Smithsonian de Astrofísica, detectó el segundo tránsito de una supertierra. Bautizada como GJ 1214b, es atípica: su densidad media es más próxima a la del agua que a la de la roca, lo que sugiere una atmósfera muy voluminosa.

Por tanto, ningún planeta guarda semejanza con el nuestro. Buscamos mundos habitables, pero parece ser que sólo encontramos monstruos. Y es de esperar que aparezcan aún más planetas singulares. Alrededor de las estrellas muy ricas en carbono, por ejemplo, cabe imaginar que los compuestos principales de los planetas sólidos no se basen en el oxígeno y el silicio, como es el caso de los planetas rocosos del sistema solar, sino en el silicio y el carbono. Estos también serían planetas muy distintos al nuestro. Como consecuencia de la compresión del carbono, sus interiores se hallarían compuestos sobre todo por diamante.

Sin embargo, puesto que la mayoría de los sistemas planetarios cuentan con una composición química similar a la del nuestro, es de esperar que la mayor parte de las supertierras se parezcan a nuestro planeta, con una mayoría de compuestos de silicio, oxígeno y magnesio, algo de hierro, pequeñas cantidades de otros elementos y, quizá, cantidades ingentes de agua.

Viaje al centro de una supertierra

Según en qué región de sus sistemas planetarios se hayan formado, podemos considerar dos categorías principales de supertierras. Aquellas nacidas lejos de su estrella habrán recogido grandes cantidades de hielo primordial (el que se forma al tiempo que el sistema planetario), por lo que contendrán mucha más agua que los planetas rocosos del sistema solar. Por otra parte, las supertierras que se formen más cerca de sus estrellas, en regiones calientes y sin hielo, serán bastante más secas, como la Tierra, Marte o Venus.

Un planeta rocoso nace a partir de una mezcla de material fundido que comienza a enfriarse. A medida que solidifica, se forman en el magma cristales de hierro y de silicatos. En función de la cantidad de oxígeno presente, habrá una parte del hierro que no se incorporará a los minerales, permanecerá en estado líquido y, debido a su mayor densidad, se asentará en el centro. Al igual que la Tierra, un planeta así adoptará una estructura en capas, con un núcleo de hierro y un manto de silicatos.

Por otro lado, los planetas mucho mayores que la Tierra deberían presentar una diferencia importante con respecto a nuestro planeta. En la Tierra, a lo largo de miles de millones de años, el núcleo se ha enfriado y su región interna se ha solidificado. Sin embargo, la parte externa del núcleo permanece líquida y agitada por corrientes convectivas. Se cree que la convección del núcleo externo es la que genera el campo magnético terrestre.

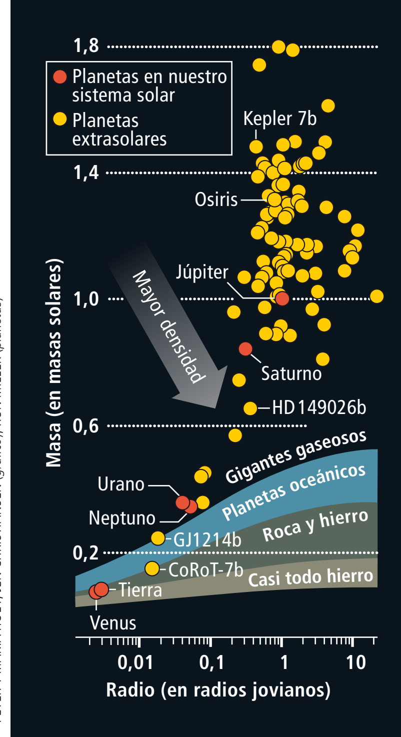
En cambio, a las altas presiones propias del núcleo de un planeta de tamaño mucho mayor, cálculos teóricos recientes indican que el hierro podría solidificar incluso a temperaturas tan elevadas como 10.000 grados Kelvin. Temperaturas mayores se dan sólo en los planetas muy jóvenes, por lo que, tras un breve período de enfriamiento, parece razonable suponer que el núcleo de la mayoría de las supertierras habrá

VIDA Y GEOFISICA

La actividad geofísica parece crucial para que un planeta pueda albergar vida. Los modelos teóricos y las simulaciones por ordenador, junto a lo que ya sabemos sobre la Tierra y los demás planetas del sistema solar, permiten predecir la dinámica de un planeta con masa y composición determinadas. Las simulaciones de supertierras se han centrado en dos clases particulares que se creen comunes en la galaxia, mostradas aquí en comparación con la Tierra. En ambos casos, la convección agita con suavidad las capas interiores y transporta el calor interno hacia la superficie. Ello potencia el vulcanismo y la tectónica de placas, fenómenos que ayudan a mezclar las sustancias químicas en la atmósfera, proporcionan nutrientes para la vida y estabilizan las temperaturas superficiales.

▼ TRES TIPOS ROCOSOS

Se han detectado más de 80 tránsitos de planetas. En tales casos es posible medir la masa y el radio, y calcular la densidad media, lo que impone fuertes restricciones sobre la posible composición química. Se cree que los planetas menos densos son gigantes gaseosos; los de mayor densidad podrían ser rocosos, con cantidades variables de hierro y agua. Los de mayor densidad todavía, se encontrarían formados sobre todo por hierro.

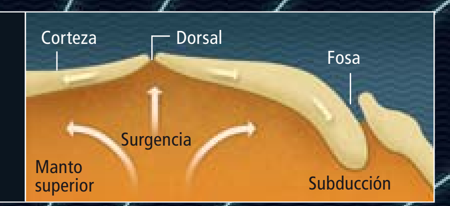


PETER Y MARIA HOEY; JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*); RON MILLER (*planetas*)

HIERRO Y ROCA (TIERRA)

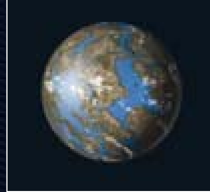
En la Tierra, la convección del manto de silicatos origina el vulcanismo y la tectónica de placas. El calor interno es en parte un remanente de la formación del planeta y en parte producto de la radiactividad en el manto. Se cree que la convección de hierro líquido en el núcleo exterior produce el campo geomagnético, el cual ayuda a proteger la vida de los rayos cósmicos y del viento solar.





SUPERTIERRA DE HIERRO Y ROCA

Un planeta con una composición similar a la de la Tierra pero con una masa superior produciría más calor radiactivo. En consecuencia, la convección podría ser hasta 10 veces más veloz. Las placas tectónicas serían más delgadas, ya que un ciclo geológico más rápido les dejaría menos tiempo para aumentar su grosor. No habría núcleo líquido, por lo que tampoco se generaría un campo magnético. Ello podría suponer un problema para la aparición de vida sobre tierra firme.





AGUA, HIERRO Y ROCA (MUNDO OCEANICO)

Un mundo hecho de grandes cantidades de agua además de hierro y roca exhibiría dos mantos sólidos: uno rocoso y otro de hielo como consecuencia de las enormes presiones generadas bajo un océano de cientos de kilómetros de profundidad. Habría convección en los dos mantos.



En algunos aspectos, los planetas rocosos de mayor masa podrían ser más receptivos a la vida que los planetas del tamaño de la Tierra

solidificado. Una supertierra típica tendría entonces un núcleo de hierro sólido y ningún campo magnético global. Sobre la Tierra, el campo magnético ayuda a proteger la vida de los efectos nocivos del viento solar y de los rayos cósmicos, al menos sobre tierra firme. De todos modos, no sabemos aún si la existencia de un campo magnético es indispensable para la aparición de vida.

Un planeta muy rico en agua desarrollaría propiedades aún menos familiares. Una gruesa capa de agua (un único océano) envolvería al planeta. El agua se convierte en hielo cuando se enfría, pero también cuando se comprime. Por tanto, sobre el manto de silicatos aparecería otro manto sólido, compuesto por hielo incandescente y brillante. No se trataría de hielo común, sino de las estructuras cristalinas conocidas como hielo VII, X y XI (a día de hoy, sólo se han observado en experimentos de laboratorio).

Con independencia de su contenido en agua, la gran masa de una supertierra implica que en su interior se alcanzan presiones enormes. Dados dos planetas con igual composición, el de mayor masa es siempre el más denso. Bajo condiciones extremas de presión, los materiales se tornan más duros que los que se hallan en el interior de nuestro planeta, quizá más duros que el propio diamante. ¿Cómo se comporta un material de tipo terrestre bajo semejantes presiones? También para resolver esta cuestión se desarrollan modelos teóricos y se realizan experimentos.

Hace poco se ha descubierto que cierto mineral del manto terrestre adopta una nueva fase, denominada postperovskita, cuando se comprime a muy altas presiones [*véase* "El ingrediente secreto de la Tierra", por K. Hirose; Investigación y Ciencia, agosto de 2010]. Aunque en el caso de la Tierra dicho mineral sólo da lugar a una fina capa del manto terrestre, cabe suponer que el mismo formará la mayor parte del manto de las supertierras. La teoría sugiere que existe otra fase más densa, si bien los experimentos aún no han confirmado su existencia.

Una vez conocida la estructura del planeta y los materiales que componen sus capas, el siguiente paso es comprender la dinámica —si es que existe alguna— de esa estructura. En otras palabras, averiguar si el planeta es geológicamente activo, como la Tierra, o pasivo y congelado, como Marte.

En la Tierra, la convección del manto es el motor de la mayoría de los procesos geológicos. Bajo la corteza terrestre, el manto caliente asciende hacia la superficie y desciende de nuevo cuando se enfría, de modo parecido a la convección del agua que hierve en una olla. Parte de ese calor es el remanente de la formación del planeta; otra parte proviene de la desintegración de los elementos radiactivos del manto. Es razonable suponer que las supertierras tengan concentraciones similares de fuentes radiactivas, al menos de uranio y torio, ya que estos elementos se hallan distribuidos por la galaxia de manera uniforme y se incorporan con facilidad a los planetas durante su formación. Por tanto, al ser mayores que nuestro hogar y, en términos absolutos, contar con más material radiactivo, las supertierras deberían generar más calor interno y desarrollar en el manto una mayor dinámica convectiva.

Planetas aptos para la vida

Los efectos de una mayor agitación convectiva se muestran importantes y afectan, en última instancia, a la habitabilidad del planeta. Una inesperada consecuencia es que, cuanto mayor sea un planeta, más delgadas deberían ser sus placas tectónicas. La convección del manto se manifiesta en la superficie como tectónica de placas, las cuales se desplazan a medida que el manto se agita. Cuando dos placas chocan, una de ellas se desliza bajo la otra y se hunde en el manto (subducción).

Las placas son muy delgadas en las dorsales oceánicas, zonas en las que se forman debido, en parte, al material fundido del manto que emerge a la superficie. Una placa aumenta su grosor a medida que se enfría y se desplaza hacia las zonas de subducción. Según nuestros modelos, la mayor convección en los planetas muy masivos implica que las placas se desplazan con mayor rapidez y disponen de menos tiempo para enfriarse y aumentar su espesor. Por un lado, al ser más delgadas, las placas deberían deformarse con mayor facilidad; por otro, una mayor gravedad implica una presión mayor en las fallas, lo que las hace más resistentes al deslizamiento. El efecto neto es que, si bien la dinámica en una supertierra tiene lugar más rápido, la resistencia de las fallas no varía mucho entre planetas de distinto tamaño.

Una tectónica de placas más activa supone un factor positivo de cara a la habitabilidad de un planeta. En la Tierra, la actividad geológica y el vulcanismo expulsan a la atmósfera dióxido de carbono y otros gases. El dióxido de carbono reacciona con el silicato de calcio para dar carbonato de calcio y dióxido de silicio. Ambos productos son sólidos y acaban sedimentando en los fondos oceánicos. Cuando la corteza oceánica subduce y se sumerge de nuevo en el manto, incorpora en éste sedimentos ricos en carbonos. Por tanto, la subducción reinyecta carbono en el manto, y parte de ese carbono regresará de nuevo a la atmósfera.

Los autores

Dimitar D. Sasselov es profesor de astronomía en la Universidad de Harvard desde 1998. Obtuvo un doctorado en física por la Universidad de Sofía y otro en astronomía por la Universidad de Toronto. Estudia la evolución y estructura de las estrellas y de los planetas extrasolares. Es fundador y director de la Iniciativa de Harvard para los Orígenes de la Vida, que reúne a físicos y biólogos. **Diana Valencia** obtuvo su doctorado por la Universidad de Harvard en 2008 con una investigación seminal que combinaba geofísica y astrofísica con el propósito de clarificar la estructura y la dinámica de los planetas sólidos. Actualmente ocupa la plaza de postdoctorado Henri Poincaré en el Observatorio de la Costa Azul de Niza. En 2010 ha sido galardonada con la beca Sagan de la NASA.

ATENTOS A 150.000 SOLES

El observatorio espacial Kepler, de la NASA, en órbita desde 2009, tiene como objetivo el descubrimiento de nuevos planetas. Observa de manera continua más de 150.000 estrellas en una región del cielo en torno a la constelación del Cisne, y mide su brillo para detectar tránsitos planetarios. Los 42 sensores digitales de su cámara cuentan con una resolución conjunta de 95 millones de píxeles y pueden detectar caídas en el brillo de apenas un 0,01 por ciento. Para distinguir las señales reales del ruido, Kepler necesita detectar los posibles tránsitos varias veces y, por tanto, ha de monitorizar las mismas estrellas durante años. Kepler ya ha descubierto nuevos planetas, pero sus mejores resultados se esperan dentro de unos pocos años.



CORTESIA DE NASA KEPLER MISSION (*sonda*); CORTESIA DE CARTER ROBERTS NASA (*Vía Láctea*)

Este ciclo carbonato-silicato actúa como un termostato que regula la temperatura global de la superficie. En el caso de la Tierra, es este ciclo el que ha ayudado a mantener las temperaturas próximas a las del agua líquida durante miles de millones de años. La tectónica de placas recicla también otros minerales y gases críticos para la vida; entre ellos, algunos compuestos muy ricos en energía como el sulfuro de hidrógeno, que podría haber sido el motor de la vida antes de que la fotosíntesis apareciese sobre la Tierra.

La activa convección de las supertierras implicaría unas escalas temporales de producción y subducción de placas más cortas y, con ello, un ciclo carbonato-silicato más rápido y robusto. En algunos aspectos, las supertierras podrían ser incluso más aptas para la vida que los planetas de tamaño terrestre. Es más, una masa mayor ayudaría a que estos planetas conservaran su atmósfera y agua, ya que impediría que éstas escaparan al espacio exterior. Este punto reviste especial importancia para los planetas cuya distancia a su estrella es mayor que la existente entre Marte y el Sol.

Al comparar la Tierra con los modelos teóricos de las supertierras de distintos tamaños, hallamos pues toda una variedad de condiciones planetarias estables similares a las terrestres. Pero esta familia de planetas apenas incluye a la propia Tierra. Al ser menor, nuestro planeta se muestra más vulnerable. De hecho, los planetas de nuestro sistema solar menores que la Tierra presentan una actividad geológica reducida. Venus cuenta con una tectónica de placas muy limitada; Marte se estancó hace tiempo y ya no produce emisiones suficientes para reponer su fina atmósfera. Parece que nuestro planeta cuenta con el tamaño mínimo necesario para haber escapado a ese destino. De todos modos, no existen pruebas concluyentes de que la tectónica de placas sea esencial para que exista vida.

Imágenes familiares

¿Qué clase de paisaje contemplaríamos en una supertierra sólida? A primera vista, y dejando al margen la posible presencia de vida, no diferiría mucho de los de nuestro planeta. Los procesos geológicos descritos habrían de formar continentes, montañas, océanos y una atmósfera con nubes.

Sin embargo, la tectónica de placas sería hasta 10 veces más rápida que la terrestre. Las montañas crecerían y se erosionarían a un ritmo mayor y, bajo una gravedad más intensa, no alcanzarían gran altura (al contrario que las montañas de nuestro vecino Marte, de menor tamaño y donde se hallan los *Mons* Olympus, las montañas más altas del sistema solar, con 21 kilómetros de altura). La composición de la atmósfera también diferiría como consecuencia de una mayor actividad volcánica y de una diferente tasa de escape de los gases hacia el espacio.

La era de la exploración de las supertierras acaba de comenzar. Nos atrevemos a anticipar una pronta detección de cientos de ellas por parte de la misión espacial Kepler. El siguiente paso consistirá en estudiar sus atmósferas para buscar signos de vida. Para ello harán falta, por lo menos, dos datos más: la composición de los planetas y la de los gases que forman parte de sus atmósferas (una cuestión directamente relacionada con su dinámica interna).

Al estudiar el espectro de la luz proveniente de las supertierras será posible analizar la presencia de moléculas como agua, dióxido de carbono o metano. En unos pocos años, el Telescopio Espacial James Webb (sucesor del telescopio Hubble), podrá observar en el infrarrojo y obtendrá información sobre las atmósferas de las supertierras. Algunos de los objetivos del nuevo telescopio serán seleccionados entre las supertierras más cercanas descubiertas por Kepler. Y, con suerte, puede que los sucesores de Kepler detecten el tránsito de alguna supertierra muy cercana a nosotros y, por tanto, fácil de estudiar.

Bibliografía complementaria

INTERNAL STRUCTURE OF MASSIVE TERRESTRIAL PLANETS. Diana Valencia, Richard J. O'Connell y Dimitar D. Sasselov en *Icarus*, vol. 181, n.º 2, págs. 545-554, abril de 2006.

GEOLOGICAL CONSEQUENCES OF SUPER-SIZED EARTHS. Craig O'Neill y Adrian Lenardic en *Geophysical Research Letters*, vol. 34, pág. L1920; 11 de octubre de 2007.

INEVITABILITY OF PLATE TECTONICS ON SUPER-EARTHS. D. Valencia, R. J. O'Connell y D. Sasselov en *Astrophysical Journal Letters*, vol. 670, n.º 1, págs. L45-L48; 20 de noviembre de 2007.

EXTRASOLAR PLANETS. Dimitar Sasselov en *Nature*, vol. 451, págs. 29-31; 3 de enero de 2008.

CONVECTION SCALING AND SUBDUCTION ON EARTH AND SUPER-EARTHS. Diana Valencia y Richard J. O'Connell en *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 286, n.os 3-4, págs. 492-502; 15 de septiembre de 2009.



1. LA CUEVA PP13B, cerca de Mossel Bay, en Sudáfrica, dio refugio a los humanos hace entre 165.000 y 35.000 años, en un momento en que *Homo sapiens* estuvo a punto de desaparecer. Esos pobladores fueron tal vez los antepasados de toda la humanidad actual.

Cuando el mar salvó a la humanidad

Poco después de la aparición de *Homo sapiens* se dieron unas condiciones climáticas extremas. Nuestra especie se salvó de la extinción gracias a los recursos que halló en la costa sur de Africa

Curtis W. Marean

Con una población mundial acercándose a los 7000 millones de personas, es difícil imaginar que *Homo sapiens* estuvo una vez a punto de extinguirse. Pero diferentes estudios genéticos sobre los humanos actuales indican que en una época remota nuestros antepasados experimentaron un descenso drástico de la población. Aunque se desconozca la cronología exacta sobre el origen de nuestra especie y de ese momento en que casi desapareció, el registro fósil demuestra que, hace unos 195.000 años, nuestra especie habitaba en toda Africa. Por entonces, la vida era plácida, gracias a un clima suave y a la abundancia de alimentos. Pero algo más tarde las condiciones climáticas empezaron a deteriorarse. El planeta entró en el estadio isotópico marino 6 (MIS6), un período glacial que duró hasta hace aproximadamente 123.000 años.

No existe un registro detallado sobre las condiciones climáticas durante el estadio isotópico 6. Pero, según los estudios de períodos glaciares posteriores mejor conocidos, se trató de una época fría y árida, con desiertos más extensos que los actuales. Gran parte de las masas continentales resultaban inhabitables. Mientras el planeta era asolado por este régimen glacial, la población humana cayó en picado, desde más de 10.000 individuos hasta unos pocos cientos. Los estudios genéticos dan diferentes estimaciones sobre la fecha en que se produjo ese cuello de botella y la merma de población, pero todos indican que los humanos actuales descendemos de un pequeño grupo que vivió en algún lugar de Africa durante la fase glacial.

Inicié mi carrera de arqueólogo en el este de Africa, donde estudiaba el origen de los humanos anatómicamente modernos. Pero mi interés empezó a cambiar cuando, a principios de los años noventa, los genetistas propusieron la existencia de un cuello de botella evolutivo. Los humanos actuales presentamos una escasa diversidad genética, en comparación con otras especies de tamaño poblacional y distribución geográfica más reducidos. Ello se explica por la presencia de un colapso poblacional en los primeros *Homo sapiens*. Me preguntaba entonces en qué lugar lograron sobrevivir nuestros antepasados a la catástrofe climática. Sólo un puñado de regiones africanas habría contado con suficientes recursos naturales para abastecer a grupos de cazadores-recolectores. Los paleoantropólogos han debatido intensamente sobre la localización de la zona ideal. La costa meridional de Africa, rica en moluscos y plantas comestibles a lo largo del año, podía haber constituido un buen refugio durante esa época rigurosa. En 1991, decidí trabajar allí y buscar yacimientos que conservasen restos del estadio isotópico 6.

Mi elección de la costa sudafricana no fue aleatoria. Buscaba abrigos cercanos a la antigua línea de costa desde donde se pudiese obtener fácilmente marisco. Asimismo, debían hallarse a suficiente altitud, de modo que no hubiesen sufrido erosión, hace 123.000 años, cuando el clima se volvió más cálido y el nivel del mar ascendió. En 1999, junto a mi colaborador sudafricano Peter Nielssen, decidimos investigar en algunas cuevas de Pinnacle Point, un promontorio que se adentra en el océano Indico, cerca de la ciudad de Mossel Bay. En los escarpados acantilados de esa región descubrimos una cueva que parecía prometedora; la denominamos PP13. La erosión de los

CONCEPTOS BASICOS

- Hace entre unos 195.000 y 123.000 años, la población de *Homo sapiens* cayó en picado porque las condiciones climáticas más frías y áridas hicieron inhabitable gran parte del territorio. Los humanos actuales descendemos de un pequeño grupo de individuos que sobrevivió a la catástrofe.
- Gracias a su abundancia en mariscos y plantas comestibles, la costa meridional de Africa constituiría una de las escasas zonas donde los humanos habrían persistido durante la crisis climática.
- Las excavaciones realizadas en esa región han proporcionado numerosos restos de la posible población progenitora de los humanos actuales.
- Los hallazgos confirman la hipótesis de que las capacidades cognitivas avanzadas aparecieron antes de lo que se pensaba. Estas habrían desempeñado un papel clave en la supervivencia de nuestra especie.

PER-ANDERS PETTERSON



DON FOLEY (*mapa*); LUCY READING-IKKANDA (*globo*)

sedimentos cercanos a la entrada había dejado al descubierto niveles con restos arqueológicos, entre los que había restos de utensilios líticos y de hogares. Y mejor aún, una duna de arena y una capa estalagmítica cubrían los niveles con los restos de actividad humana, lo que apuntaba a su remota edad. El descubrimiento parecía fortuito. Al año siguiente empezamos las excavaciones en el yacimiento, al que accedíamos valiéndonos de una escalera de madera de 180 peldaños.

Desde entonces, mi equipo de excavación ha recuperado en PP13B y otros yacimientos cercanos muestras de las actividades de los humanos que habitaron esa región hace entre 164.000 y 35.000 años. Es decir, durante la época en que se produjo el cuello de botella evolutivo y en el período posterior de recuperación de la población. El estudio de los depósitos de esas cuevas y los análisis paleoambientales nos han permitido reconstruir la forma en que los pobladores prehistóricos de Pinnacle Point lograron sobrevivir durante la crisis climática. Los restos también contradicen la antigua idea de que las capacidades cognitivas modernas evolucionaron mucho después de la aparición de nuestra anatomía moderna: hemos hallado numerosos indicios de comportamientos complejos en los niveles más antiguos de PP13B. Sin duda, un intelecto más desarrollado contribuyó a la supervivencia de la especie, lo que permitió a nuestros antepasados sacar provecho de los recursos disponibles en la costa.

Mientras que en otras partes del continente las poblaciones de *Homo sapiens* desaparecían, ya que el frío y la aridez provocaban la extinción de los animales que cazaban y las plantas que recolectaban, los afortunados habitantes de Pinnacle Point disfrutaban de abundantes mariscos y plantas ricas en hidratos de carbono que proliferaban a pesar de las condiciones



2. ELEVADOS Y SECOS. La búsqueda de yacimientos arqueológicos que daten del estadio isotópico 6 debe realizarse entre los abrigos costeros desde donde en su día hubiera un fácil acceso a los recursos marinos. Asimismo, deben situarse a suficiente altura para que los restos no fueran arrastrados cuando el nivel del mar ascendió, hace unos 123.000 años. El yacimiento PP13B y otras cuevas en la pared del acantilado del promontorio de Pinnacle Point cumplen esos requisitos y han proporcionado numerosas restos que se remontan a ese momento crítico de la historia de la humanidad.

climáticas adversas. Durante el estadio isotópico 6 se sucedieron ciclos de fases templadas y frías que produjeron ascensos y descensos en el nivel del mar y, por tanto, avances y retrocesos en la línea de costa. Pero si los humanos se desplazaban según lo hacía la línea de costa, podían seguir accediendo a los envidiables recursos.

El cuerno de la abundancia

Desde el punto de vista de la supervivencia, lo que hacía atractivo a la costa sur de Africa era su combinación peculiar de plantas y animales. A lo largo de la costa se extiende una estrecha franja de tierra que presenta la mayor diversidad de plantas del mundo. Se trata de la Región Floral del Cabo, una zona de 90.000 kilómetros cuadrados que cuenta con la extraordinaria cifra de 9000 especies vegetales, de las que casi un 64 por ciento son endémicas. De hecho, la famosa Montaña de la Mesa, cerca de Ciudad del Cabo, posee más especies de plantas que el Reino Unido. Los dos tipos de vegetación más comunes de la región son el *fynbos* y el *renosterveld*, compuestos principalmente por arbustos. Para un recolector equipado con un palo para cavar, esas comunidades vegetales ofrecen numerosos recursos. En ellas se halla la mayor diversidad mundial de geófitos, plantas que desarrollan órganos subterráneos de reserva energética, como tubérculos, bulbos y rizomas.

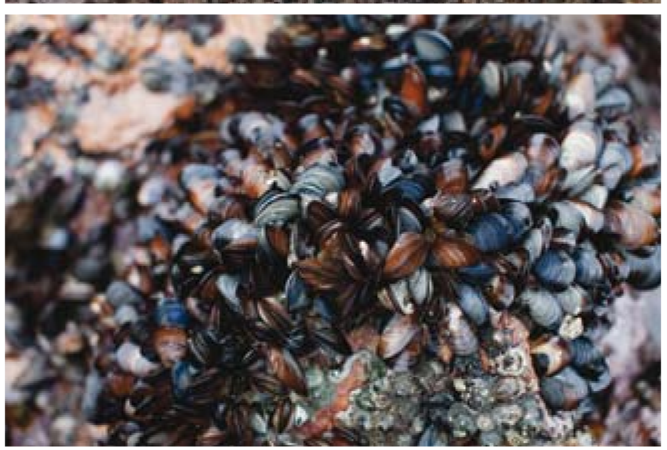
Los geófitos constituyen una importante fuente de alimentos para los cazadores-recolectores actuales. Contienen gran cantidad de hidratos de carbono, que alcanzan su concentración máxima en ciertos momentos del año. A diferencia de lo que sucede con los frutos y semillas, situados en la parte aérea de la planta, pocos animales consumen los órganos subterráneos. Además, en comparación con otras plantas geófitas más fibrosas, los tubérculos y los bulbos que proliferan en la Región Floral del Cabo presentan menos fibra con respecto al contenido en hidratos de carbono. Ello los hace más digeribles para los niños (además, la cocción mejora su digestibilidad). Y debido a que los geófitos están adaptados a las condiciones secas, representarían un recurso fácilmente disponible en las fases glaciales áridas.

A pesar de la escasez de caza aprovechable para los grandes mamíferos, la costa sudafricana ofrece otros recursos proteínicos. En el mismo litoral, el contacto entre las corrientes frías y ricas en nutrientes del afloramiento de Benguela con la corriente templada de Agulhas crea una mezcla que forma numerosos remolinos a lo largo de la costa. Esta variedad de ambientes oceánicos genera una gran diversidad de lechos de mariscos en zonas rocosas intermareales y playas. El marisco es rico en proteínas y ácidos grasos omega 3. E igual que los geófitos, tampoco escasea en los períodos fríos. Al contrario, el descenso de la temperatura oceánica incrementa su abundancia.

Capacidad de supervivencia

Gracias a esa combinación de recursos (el marisco, con un alto contenido calórico y proteínico, y las plantas geófitas, con órganos ricos en hidratos de carbono y pobres en fibra), la costa sudafricana habría proporcionado la dieta ideal a los humanos durante el estadio isotópico 6. Además, las mujeres habrían obtenido ambos recursos, sin necesidad de depender de los hombres para procurarse alimentos de calidad para sí mismas y sus hijos. En PP13B no hemos obtenido todavía pruebas sobre el consumo de plantas geófitas, ya que los yacimientos de esa edad raramente conservan restos orgánicos (sí hemos hallado abundantes restos en otros yacimientos más recientes de




3. EN BUSCA DE MARISCO. El marisco, rico en proteínas, habría contribuido a la supervivencia de la población de Pinnacle Point. Este recurso abunda durante todo el año en los arrecifes de la zona intermareal de la costa sudafricana (*izquierda, arriba*). Se han hallado restos de mejillón marrón (*izquierda, abajo*) en los niveles más antiguos de PP13B, que datan de hace 164.000 años; ello demuestra que el aprovechamiento de los recursos marinos era más antiguo de lo que se pensaba. Además de los mejillones, los pobladores de Pinnacle Point recolectaban lapas y caracoles de mar (*alikreukel*), y recogían conchas vacías de gasterópodos císidos por su bonita apariencia (*derecha*).



la región). En cambio, hemos observado en PP13B numerosos indicios del consumo de moluscos. El estudio de las conchas descubiertas en el yacimiento, llevado a cabo por Antonieta Jerardino, de la Universidad de Barcelona, demuestra que los pobladores de la costa recolectaban mejillones y unos caracoles de mar de la zona (*alikreukel*). En ocasiones consumían también mamíferos marinos, como focas o ballenas.

Los ejemplos más antiguos que se conocían sobre el aprovechamiento sistemático de recursos marinos databan de algo menos de 120.000 años. Pero las dataciones efectuadas por Miryam Bar-Matthews, del Servicio Geológico de Israel, y Zenobia Jacobs, de la Universidad de Wollongong, indican que los humanos que habitaron PP13B se alimentaban del mar mucho antes de esa fecha. En 2007, publicamos en la revista *Nature* que el aprovechamiento de recursos marinos se remonta a hace 164.000 años, y que hace 110.000 años la dieta se había diversificado e incluía especies como lapas y moluscos de playa.

Obtener esos alimentos es más difícil de lo que parece. Los mejillones, lapas y caracoles de mar viven en la traicionera zona intermareal, donde un golpe de mar puede arrastrar a un recolector desafortunado. A lo largo de la costa sudafricana sólo se puede marisquear de forma segura durante la bajamar de las mareas vivas. Esta situación se da cuando el Sol y la Luna se encuentran alineados y ambos ejercen su máxima fuerza gravitatoria en el flujo y reflujo de las aguas. Las mareas guardan relación con las fases lunares y se adelantan 50 minutos cada día. Los grupos que vivieron en PP13B hace 164.000 años, cuando la cueva se situaba entre dos y cinco kilómetros tierra adentro, debieron programar sus excursiones a la orilla usando algún tipo de calendario lunar.

Pero el marisqueo no era la única actividad compleja llevada a cabo en Pinnacle Point hace 164.000 años. Entre los útiles líticos se han hallado numerosas láminas, diminutas lascas el doble de largas que anchas, demasiado pequeñas para haber sido usadas directamente con las manos. Así que éstas debían fijarse a alguna vara de madera para emplearse a modo de proyectil. La fabricación de instrumentos compuestos exige unos conocimientos técnicos notables y las láminas de PP13B representan uno de los ejemplos más antiguos de esa capacidad. Pero pronto nos dimos cuenta de que las láminas eran más complejas de lo que pensábamos.

La mayoría de los instrumentos líticos hallados en los yacimientos de la costa sudafricana son de cuarcita. Esta roca de grano grueso es ideal para fabricar grandes lascas, pero inapropiada para dar forma a pequeños y refinados útiles. Para obtener las láminas, los humanos utilizaron otro tipo de roca, la silcreta. Pero según Kyle S. Brown, del Instituto de los Orígenes Humanos de la Universidad estatal de Arizona, la silcreta de los utensilios de Pinnacle Point y otros yacimientos ofrece un aspecto particular: es lustrosa y de color

rojizo y gris, distinta de la roca en su forma natural. Además, resulta casi imposible fabricar láminas a partir de la silcreta en su estado bruto. ¿De dónde procedía entonces la silcreta de calidad superior?

Obtuvimos una posible respuesta en la cueva 5-6 de Pinnacle Point, donde en 2008 hallamos un gran bloque de silcreta envuelto de cenizas. Su color y apariencia lustrosa se asemejaban a los de la silcreta de otros yacimientos de la región. Dada la asociación de ese bloque con las cenizas, nos preguntamos si los fabricantes primitivos habrían expuesto la silcreta al fuego para tallarla con mayor facilidad. Este tipo de estrategia se ha descrito en informes etnográficos sobre pueblos nativos norteamericanos y australianos. Para verificarlo, Brown calentó con cuidado bloques de silcreta y con ellos intentó moldear instrumentos. La tarea resultó sencilla y la superficie de las lascas mostraba el mismo brillo que los artefactos arqueológicos. Concluimos que la silcreta de los yacimientos había recibido también un tratamiento térmico.

Sin embargo, la idea no fue fácilmente aceptada por otros científicos. La doctrina arqueológica sostenía que el tratamiento térmico se había inventado en Francia durante el Solutrense, hace unos 20.000 años, para dar forma a unos magníficos instrumentos. Para reforzar nuestra hipótesis utilizamos tres técnicas. Chantal Tribolo, de la Universidad de Burdeos, realizó un análisis de termoluminiscencia para determinar si la silcreta de Pinnacle Point se había calentado a propósito. Andy Herries, de la Universidad de Nueva Gales del Sur, midió la susceptibilidad magnética de la roca, otro indicador de la exposición al calor aplicable a minerales ricos en hierro. Finalmente, Brown utilizó un medidor de brillo para cuantificar el lustre producido al calentar y tallar la silcreta, y lo aplicó a los útiles que fabricó. El año pasado publicamos nuestros resultados en *Science*, donde demostramos que el tratamiento térmico constituía una práctica habitual en Pinnacle Point hace 72.000 años, y que los humanos lo habían utilizado de forma intermitente desde hacía unos 164.000 años.

El tratamiento térmico atestigua la posesión de dos capacidades cognitivas modernas. En primer lugar, aquellos humanos entendían que podían modificar la roca natural y hacerla útil. Conocían los cambios que producía el calor: transformaba una roca de baja calidad en un material de mejores propiedades. En segundo lugar, podían inventar y llevar a cabo una larga secuencia de procedimientos. La fabricación de láminas de silcreta requería ejecutar con cuidado una compleja serie de pasos: enterrar la silcreta en arena para impedir el contacto directo con el fuego, elevar lentamente la temperatura del fuego hasta los 350 grados centígrados, mantener esa temperatura y, por fin, hacerla descender de forma gradual. Para crear y desarrollar esta secuencia y trasmitirla de generación en generación se valían sin duda de un lenguaje. Una vez adquiridas, esas capacidades ayudaron a nuestros antepasados a competir con las otras especies humanas más arcaicas que encontraron al propagarse fuera de Africa. En particular, la técnica del tratamiento térmico identificada en Pinnacle Point habría supuesto una gran ventaja para los primeros humanos anatómicamente modernos que se adentraron en el frío territorio de los neandertales, carentes de esa técnica.





4. CAVAR PARA ALIMENTARSE. Las plantas geófitas poseen órganos subterráneos de reserva energética (*izquierda*); contienen hidratos de carbono y son comestibles en ciertos momentos del año. La vegetación particular que abunda en la costa meridional africana, como el *fynbos* o matorral (*derecha*) está compuesta por numerosos geófitos. Estos pudieron servir de alimento básico a los primeros humanos anatómicamente modernos de la región durante el estadio isotópico 6.

CORTESIA DE J. C. DE VYNCK

Origen de la inteligencia

Además de habilidades técnicas, los habitantes prehistóricos de Pinnacle Point contaban también con dotes artísticas. En los niveles más antiguos de PP13B, mi equipo ha recuperado decenas de fragmentos de ocre rojo (óxidos de hierro). Estos se habían esculpido de diferentes formas y se habían molido hasta lograr un polvo fino que se habría mezclado con un aglutinante, como grasa animal, para obtener una pintura que tal vez se aplicaba en el cuerpo u otras superficies. Este tipo de adornos normalmente indicaban la identidad social u otros aspectos culturales importantes, es decir, servían para crear símbolos. Pensamos que el uso del ocre constituye la prueba más antigua en el registro arqueológico de un comportamiento simbólico; calculamos que su aparición se remonta a algunas decenas de miles de años. Hemos hallado también

El autor

Curtis W. Marean es profesor de la facultad de evolución humana y cambio social de la Universidad estatal de Arizona y miembro del Instituto de los Orígenes Humanos. Sus estudios tratan sobre el origen de los humanos anatómicamente modernos, la prehistoria africana, paleoclimas y paleoambientes, y los restos de fauna en diferentes yacimientos arqueológicos. Se interesa en particular por la ocupación humana de los ecosistemas costeros. Es investigador principal del proyecto Paleoclima, paleoambiente, paleoecología y paleoantropología de la costa sudafricana (SACP4), financiado por la Fundación Nacional de la Ciencia.



5. BORDES CORTANTES. Entre los útiles líticos hallados en PP13B se incluyen elementos complejos, como pequeñas láminas (*dos filas inferiores*) que se habrían fijado a varas de madera para obtener proyectiles. Los talladores también trataron térmicamente la piedra para moldearla, una técnica cuyo origen se había situado en Francia en una época muy posterior.

PER-ANDERS PETTERSON

indicios de actividades de tipo simbólico en niveles más modernos. Los niveles que datan de 110.000 años de antigüedad contienen fragmentos de ocre y algunas conchas recogidas sin duda por sus propiedades estéticas, ya que cuando fuesen arrojadas a la orilla desde su morada en aguas profundas, la carne del molusco ya habría desaparecido. En mi opinión, la presencia de esas conchas decorativas y las pruebas sobre el aprovechamiento de recursos marinos demuestran que, por primera vez en la historia, esos grupos humanos habían incorporado en su visión del mundo y en sus rituales una estrecha relación con el mar.

La aparición precoz de objetos simbólicos y de técnicas complejas en Pinnacle Point tiene importantes implicaciones en el conocimiento sobre el origen de nuestra especie. Unos fósiles humanos hallados en Etiopía revelan la existencia de humanos anatómicamente modernos hace al menos 195.000 años. Pero el origen de la mente moderna es más difícil de establecer. A partir del registro arqueológico, los paleoantropólogos han utilizado diferentes vías para identificar la presencia y el alcance de las capacidades cognitivas. Una de ellas es el hallazgo de artefactos elaborados mediante técnicas que exigen establecer relaciones de causa-efecto entre fenómenos aparentemente desconectados y formar largas cadenas de producción —como sucede en el tratamiento térmico de las rocas para la elaboración de útiles líticos—. Otra de las estrategias consiste en el descubrimiento de arte o de otro tipo de actividad simbólica, así como de la medición del tiempo mediante las fases lunares. Durante muchos años sólo se habían encontrado ejemplos de ese comportamiento en Europa, y tenían como máximo 40.000 años de antigüedad. A partir de ese registro, los científicos demostraron el enorme lapso entre la aparición de nuestra especie y la emergencia de nuestra creatividad sin igual.

Pero en los últimos diez años, los arqueólogos han identificado en varios yacimientos sudafricanos distintas pruebas de comportamientos complejos, más antiguas que las pruebas similares halladas en Europa. El arqueólogo Ian Watts, que trabaja en Sudáfrica, ha descrito de centenares a miles de fragmentos de ocre tallados y sin tallar en diversos yacimientos que datan de hace 120.000 años. Destaca la coloración rojiza de la mayor parte de esos ocres, así como de los fragmentos de Pinnacle Point, a pesar de que los minerales de los que proceden suelen exhibir una enorme diversidad de colores. Por tanto, los humanos debían de seleccionar los fragmentos más rojos, quizás porque asociaban ese color a la menstruación y a la fertilidad. Jocelyn A. Bernatchez, estudiante de doctorado de la Universidad estatal de Arizona, piensa que la mayoría de los fragmentos de ocre habían sido primero amarillos, y se habrían tratado con calor para que adquirieran el color rojo. En la cueva de Blombos, situada a 100 kilómetros al oeste de Pinnacle Point, Christopher S. Henshilwood, de la Universidad de Bergen, ha hallado piezas de ocre con grabados regulares, cuentas de collar hechas con conchas de caracoles y refinados instrumentos de hueso, todos ellos de alrededor de 71.000 años de antigüedad [*véase* “La aparición de la mente moderna” por Kate Wong; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2005]. Esos yacimientos y los de Pinnacle Point descartan la idea de que la cognición moderna apareciese de forma tardía en nuestra evolución, y señalan que nuestra especie poseía estas habilidades desde el inicio.

Uno de los motores en la evolución de las capacidades cognitivas complejas habría sido la continua presión de la selección natural. Esta obligó a nuestros antepasados a desarrollar mapas mentales sobre la localización de los recursos y la variación estacional de muchas especies de plantas. Los conocimientos acumulados se transmitían a sus descendientes y a otros miembros del grupo. Esa capacidad sentó las bases para la aparición de muchas otras, como la de establecer una relación entre las

➥ Versión multimedia del artículo (en inglés) en: **http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=interactive-seas-saved-humanity**

fases lunares y las mareas y, en consecuencia, aprender a programar las excursiones para el marisqueo. Los moluscos y los geófitos proporcionaban una dieta de alta calidad que permitió a esos pobladores ser menos nómadas, con el consiguiente ascenso de la natalidad y reducción de la mortalidad infantil. El aumento en el tamaño del grupo estimuló la aparición de comportamientos simbólicos y de técnicas complejas, porque los humanos se esforzaban en expresar su identidad social y aprender nuevas formas de elaborar instrumentos. De ahí la observación de esas prácticas tan avanzadas en PP13B.

Desplazarse cerca del mar

El yacimiento PP13B conserva un registro muy largo de los cambios en las ocupaciones humanas y también documenta variaciones climáticas y ambientales de un largo período. Gracias a esos datos, hemos podido reconstruir el modo en que nuestros antepasados utilizaron la cueva y la costa durante milenios. Erich C. Fisher, de la Universidad de Florida, ha realizado un modelo sobre la modificación de la línea de costa a lo largo del tiempo. Ha observado así el cambio rápido y drástico en la costa asociado a una amplia plataforma continental, que se introduce suavemente en el océano más allá de la costa sudafricana y forma el talud de Agulhas. Durante los períodos glaciales, cuando el nivel del mar descendía, una extensa superficie de la plataforma habría quedado expuesta y Pinnacle Point se situaría a una distancia considerable del océano, hasta unos 95 kilómetros. Cuando el clima se volvía más templado, el nivel del mar subía y el agua volvía a cubrir el talud de Agulhas. Entonces las cuevas quedaban de nuevo cerca de la costa.

Al estudiar las características de las precipitaciones y de la vegetación registradas en las estalagmitas hace entre 350.000 y 50.000 años, hemos observado que el *fynbos* seguía la retirada de la orilla y colonizaba el talud continental, actualmente sumergido, lo que acercaba entre sí las plantas geófitas y los mariscos. Durante los períodos de escasa población, los humanos ocuparían las mejores regiones, es decir, allí donde coincidían ambos recursos alimentarios. Por tanto, esos grupos humanos se desplazarían de acuerdo con el movimiento de la línea costera, lo que explicaría la aparente ocupación intermitente de la cueva PP13B.

Nuestras excavaciones en PP13B han permitido identificar los posibles antepasados de todos los humanos actuales. Pero si nuestros datos respecto a esos humanos y a su estrecha conexión con el mar son ciertos, la mayor parte del registro arqueológico de nuestros antepasados directos se halla hoy en el sumergido talud de Agulhas. Aunque la hipótesis de los desplazamientos humanos según los movimientos de la costa podemos comprobarla en el yacimiento PP13B, así como en PP5-6, otro yacimiento que estamos excavando en la actualidad. Además, hemos iniciado el estudio de otras localizaciones donde la plataforma continental se adentra abruptamente en el océano y, por tanto, la línea de costa se ha mantenido siempre cerca.

Los registros genético, fósil y arqueológico indican que la primera migración importante fuera de Africa de los humanos anatómicamente modernos se produjo hace alrededor de 50.000 años. Pero quedan por responder numerosas preguntas con respecto a esa migración. Se desconoce aún si al final del estadio isotópico 6 había sobrevivido una única población de *Homo sapiens* en Africa o lo habían hecho varias, entre las que se encontraría la que dio lugar a todos los humanos actuales. Esas incógnitas han servido para orientar las investigaciones de mi equipo y de otros científicos: debemos localizar otras posibles zonas de Africa donde habitara esa población progenitora durante el período glacial y conocer mejor las condiciones climáticas existentes justo antes de ese estadio. Necesitamos aclarar la historia de esos humanos, que más tarde abandonaron sus refugios, poblaron todo el continente africano y terminaron por conquistar el planeta.



6. INVESTIGAR EL PASADO. Las futuras excavaciones de PP13B y de otras cuevas a lo largo de la costa meridional de Africa aportarán más información sobre la población progenitora de humanos que sobrevivió al cuello de botella evolutivo y colonizó el planeta.

PER-ANDERS PETTERSON

Bibliografía complementaria

EARLY HUMAN USE OF MARINE RESOURCES AND PIGMENT IN SOUTH AFRICA DURING THE MIDDLE PLEISTOCENE. Curtis W. Marean y otros en *Nature*, vol. 449, págs. 905-908; 18 de octubre, 2007.

FIRE AS AN ENGINEERING TOOL OF EARLY MODERN HUMANS. Kyle S. Brown y otros en *Science*, vol. 325, págs. 859-862; 14 de agosto, 2009.

OPPORTUNISTIC SUBSISTENCE STRATEGIES AMONG LATE HOLOCENE COASTAL HUNTER-GATHERERS, ELANDS BAY, SOUTH AFRICA. Antonieta Jerardino, Genevieve Dewar y Rene Navarro. *The Journal of Island and Coastal Archaeology*, vol. 4, n.º 1, págs. 37-60; 2009.

COASTAL SOUTH AFRICA AND THE CO-EVOLUTION OF THE MODERN HUMAN LINEAGE AND THE COASTAL ADAPTATION. Curtis W. Marean en *Trekking the Shore: Changing Coastlines and the Antiquity of Coastal Settlement*. Dirigido por Nuno Bicho, Jonathan A. Hawks y Loren G. Davis. Springer (*en prensa*).



MEJORA DEL ARROZ

Mediante el cruzamiento y la selección asistida por marcadores moleculares se obtienen variedades de arroz tolerantes a la sequía, la salinidad o la inmersión

Yoan Coudert, Christophe Périn, Brigitte Courtois y Pascal Gantet

CONCEPTOS BASICOS

- Teniendo en cuenta el crecimiento demográfico, la producción mundial de arroz deberá aumentar un 25 por ciento antes de 2025.
- Sobre la base de la diversidad genética natural del arroz, se seleccionan variedades que presentan genes de interés agronómico.
- Mediante el empleo de marcadores moleculares se han obtenido variedades de arroz con un alto rendimiento y tolerancia a limitaciones ambientales, como la inmersión.



1. ARROZALES EN TERRAZAS de la región de Banaue, en Filipinas, declarados Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO.

WIKIMEDIA COMMONS

Más de mil millones de personas en el mundo, es decir, una de cada seis, padecen desnutrición. Los países en vías de desarrollo sufren periódicamente hambrunas a causa del encarecimiento de materias primas y alimentos. El arroz, el cereal más consumido del mundo y fuente principal de energía para más de la mitad de la humanidad, se halla en el centro de esta crisis permanente. En 2008, su valor aumentó de 350 dólares a más de 1000 dólares la tonelada en pocas semanas.

Sin embargo, la producción mundial de arroz se ha triplicado durante los últimos 40 años gracias a la Revolución Verde. Este gran programa iniciado en los años sesenta combinó la selección de nuevas variedades productivas y los cultivos intensivos de regadío. Ello permitió adaptarse al fuerte crecimiento demográfico y garantizar en parte el suministro de alimentos. De este modo, entre 1966 y 2000, mientras que la población de los países pobres creció un 90 por ciento, la producción mundial de arroz aumentó un 130 por ciento, con un incremento medio de arroz disponible por persona del 18 por ciento.

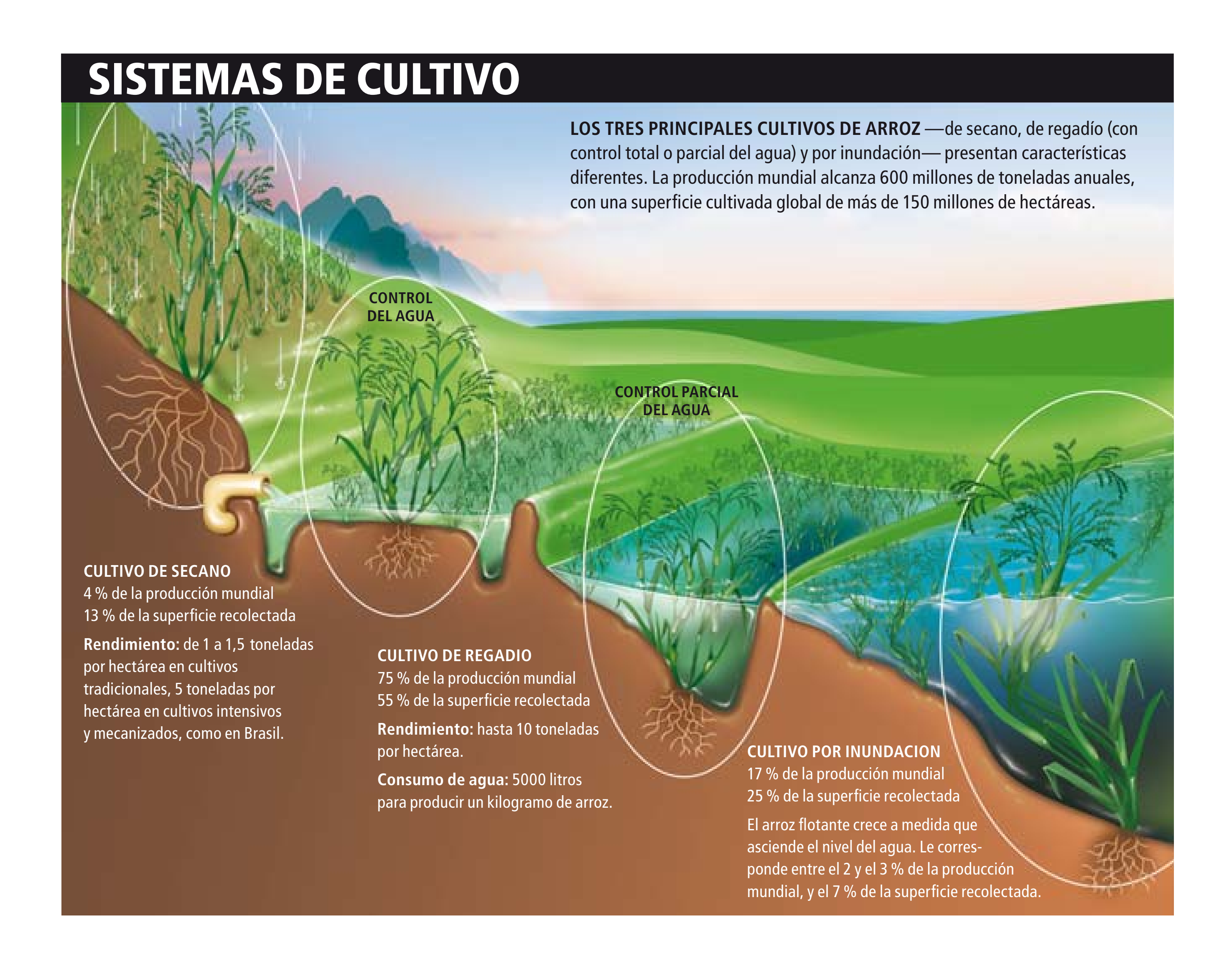
No obstante, el cultivo del arroz está sometido hoy día a fuertes limitaciones. El cultivo de regadío, sistema mayoritario empleado, exige grandes cantidades de agua dulce, recurso que está menguando en todas partes. Los lugares cultivables escasean cada vez más, porque las urbanizaciones se desarrollan a menudo en zonas agrícolas y costeras. Además, algunas de esas zonas se desecan o presentan un exceso de sal.

Según las Naciones Unidas, el crecimiento demográfico actual hace necesario un aumento de la producción de arroz de al menos un 40 por ciento antes de 2030. De ahí la importancia de crear nuevas variedades de arroz con rendimientos superiores a los de las variedades actuales, que a la vez puedan soportar factores ambientales tan diversos como la sequía, la inmersión y el exceso de sal.

Tradicionalmente, para obtener una variedad productiva que tolere un factor ambiental adverso se cruza una variedad de alto rendimiento con otra tolerante. Pero esta estrategia no permite prever los efectos de la interacción de los dos genomas y, además, puede introducir caracteres no deseados. Por otro lado, hace falta un promedio de diez años para seleccionar los descendientes de interés y multiplicar las semillas con objeto de distribuirlas a los agricultores. Resulta, pues, indispensable utilizar métodos más rápidos.

La transgénesis es uno de ellos: consiste en integrar en el genoma de una variedad de interés un gen de función conocida; se obtiene así un organismo genéticamente modificado. Sin embargo, en algunos países este método no es aceptado por los agricultores ni la población. Existe un método alternativo: la selección asistida por marcadores moleculares. Basada en el conocimiento de la diversidad genética natural de las especies cultivadas, trata de introducir

SISTEMAS DE CULTIVO



CHRISTELLE FORZALE/*Pour la Science*

en las principales variedades cultivadas formas (alelos) favorables de ciertos genes mediante el cruzamiento.

En el presente artículo se presentan los conocimientos existentes sobre la tolerancia del arroz a los tres tipos de estrés ambiental más limitantes: el déficit hídrico, el exceso de sal y la inmersión. A continuación se debate cómo se puede aprovechar esa información para crear nuevas variedades de arroz.

Con los pies en el agua

El origen del cultivo del arroz se remonta a unos 10.000 años. Se produjo de modo independiente en China y la India. Es un cereal perteneciente al género *Oryza*, que comprende 23 especies. Se cultivan sólo dos: *Oryza glaberrima*, original de Africa Occidental, y *Oryza sativa*, procedente de Asia. Esta última, la especie más extendida, se subdividió en dos subespecies hace dos o tres millones de años, después del levantamiento del Himalaya: *O. sativa japonica*, en China, y *O. sativa indica*, en la India.

La elección del sistema de cultivo de arroz depende de las condiciones climáticas y edafológicas locales. Las variedades de la subespecie *indica* están adaptadas sobre todo a los sistemas de riego e inundación, característicos de las zonas tropicales. Las variedades de la subespecie *japonica* se emplean en cultivos de regadío de zonas templadas o elevadas, o en cultivos de secano (a los que les basta el agua de las lluvias).

El éxito del cultivo del arroz reside sobre todo en su capacidad de adaptación a una amplia gama de condiciones ambientales. El hombre ha seleccionado y cultivado más de 100.000 variedades de arroz, semillas que se conservan en el Instituto Internacional de Investigaciones sobre el Arroz (IRRI, por sus siglas en inglés), en Filipinas. Se utilizan desde el nivel del mar hasta 2700 metros de altitud, en las pendientes del Himalaya, bien sea en climas tropicales, mediterráneos o templados, y en todos los continentes, excepto en la Antártida. Se dispone, por tanto, de un inmenso acervo génico, que representa una fuente

Los autores

Yoan Coudert, doctorando, y **Brigitte Courtois** y **Christophe Périn**, investigadores del Centro de Investigación Agronómica para el Desarrollo (CIRAD), trabajan en el equipo "Desarrollo adaptativo del arroz", dirigido por **Pascal Gantet**, profesor de la Universidad Montpellier 2, dentro de la unidad de "Desarrollo y Mejora de las Plantas".

de caracteres de interés agronómico para los arroces del futuro.

Debido a su interés económico y al tamaño reducido de su genoma —430 millones de nucleótidos, cinco veces menos que el maíz y 40 menos que el trigo—, el arroz se ha convertido en una de las plantas modelo de la genética vegetal. Puesto que el orden y el repertorio de genes guardan semejanza en las diferentes especies de cereales, los conocimientos adquiridos sobre el arroz deberían poder aplicarse también al trigo y al maíz.

El genoma del arroz se acabó de secuenciar en 2005. Disponemos del repertorio de sus aproximadamente 37.500 genes. Cualquier carácter agronómico visible y medible (fenotipo), como la tolerancia a la sequía o la altura de las plantas, puede asociarse a un conjunto de genes (genotipo). Los genes son responsables de ese carácter, que puede tomar cualquier valor entre dos extremos (por ejemplo, una altura mínima y una altura máxima) en el caso de un carácter cuantitativo.

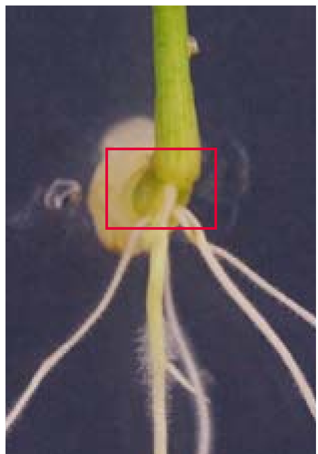
Etiquetar los genes de interés

Para crear una variedad con alto rendimiento y tolerancia a cierto factor de estrés ambiental, se deben cruzar dos variedades: el "fondo genético" de la primera variedad aporta el conjunto de genes implicados en la productividad; la segunda variedad ofrece tolerancia al factor de estrés.

Se empieza cruzando esas dos variedades. Después se hace lo propio ente los descendientes y la variedad parental de alto rendimiento; se completa así un retrocruzamiento. Tras realizar una media de seis a ocho retrocruzamientos y seleccionar en cada uno de ellos el fenotipo deseado, se obtiene una nueva variedad. Esta ha integrado los segmentos cromosómicos de los genes que confieren tolerancia al factor de estrés en el "fondo genético reconstituido" responsable del rendimiento.

Desde hace unos diez años, dicho procedimiento se ha ido sustituyendo por la selección asistida por marcadores moleculares. Esta consiste en etiquetar, en cualquier planta que se pretende cruzar, las regiones del genoma que le atribuyen las características agronómicas de interés. A tal fin, se identifican secuencias de ADN próximas a esas regiones (se reconocen por hallarse en todos los individuos de la variedad y heredarse al mismo tiempo que la zona de interés). Esas secuencias constituyen los marcadores moleculares y ocupan posiciones cromosómicas conocidas gracias a los mapas cromosómicos y a la secuencia del genoma, establecidos previamente. Los más utilizados son los microsatélites, formados por secuencias repetidas de ADN.





2. EN LAS COLECCIONES DE PLANTAS MUTANTES, cada ejemplar presenta una mutación en un gen particular. La comparación de las propiedades del mutante con las de una planta silvestre, sin la mutación, permite deducir la función del gen mutado. Un equipo de la Universidad de Nagoya centra sus estudios en las raíces nodales, que surgen de la base del tallo y constituyen la mayor parte del sistema radicular en el arroz y otros cereales (*flechas rojas*). El equipo ha aislado el mutante *CROWN ROOTLESS1*, que carece de raíces nodales (*cuadro rojo*). Estos mutantes sirven de medio para identificar los genes que participan en el desarrollo de los diferentes tipos de raíces.

YOAN COUDERT/*Pour la Science*

Las técnicas de biología molecular permiten identificar las diferentes formas (alelos) de cada marcador molecular y deducir si el ADN de una planta presenta un alelo provechoso de un gen determinado. Comparada con la selección clásica, la selección por marcadores reduce el número de retrocruzamientos necesarios a unos cuatro (en lugar de seis a ocho), y facilita una selección objetiva y temprana de las plantas descendientes.

Otro método más directo consiste en conocer con precisión la función de los genes de la planta. Se basa en las colecciones de plantas mutantes creadas los últimos años y el conocimiento de la secuencia completa del genoma del arroz y de *Arabidopsis thaliana* (planta herbácea modelo cuyo genoma se descifró en el año 2000). Las plantas mutantes están caracterizadas según sus deficiencias fenotípicas. Al comparar estas últimas con el fenotipo de la planta silvestre sin mutación, se descubren las funciones de los genes mutados y de las proteínas correspondientes. Esa información podrá ser transferida entre plantas.

Además, los seleccionadores disponen de una manera para buscar, dentro de la diversidad de arroces cultivados, los alelos que confieran tolerancia a un estrés ambiental. Pueden explotarlos con ayuda de la selección asistida por marcadores, con objeto de crear una nueva variedad.

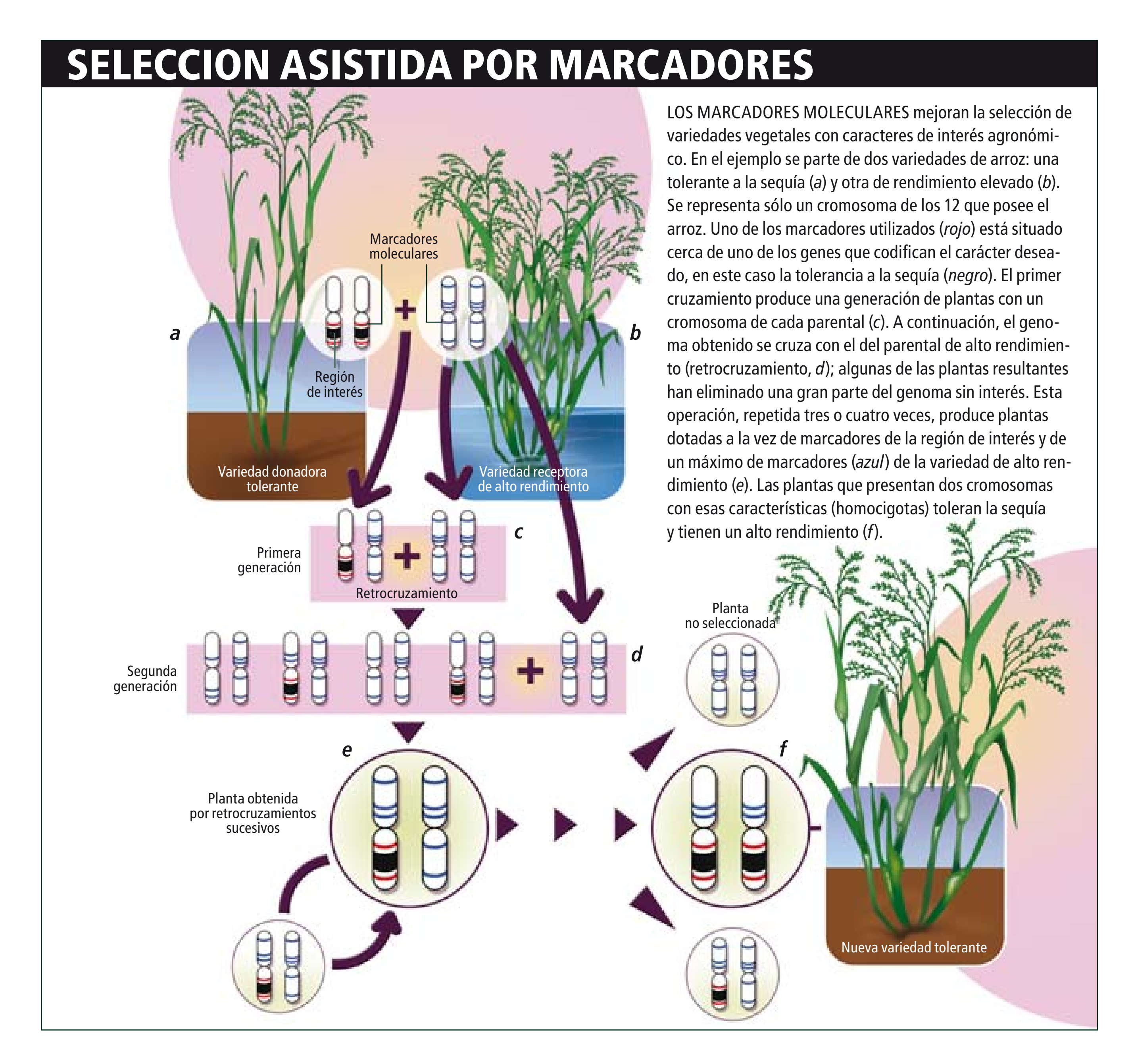
Sobrevivir sin agua

La falta puntual o prolongada de agua representa la primera amenaza ambiental de los cultivos de cereales. Los vegetales se enfrentan a ella con mecanismos de adaptación naturales. Podemos distinguir tres: esquivar, evitar y tolerar la escasez de agua. Una planta esquiva la sequía cuando sus estados del ciclo de desarrollo más sensibles están sincronizados con las épocas del año con mayor abundancia de agua. Para evitar la sequía, mantiene siempre su contenido en agua por encima de un mínimo vital. Por último, una planta tolerante es la que sufre escasos daños celulares cuando disminuye su contenido en agua.

En una planta tolerante sometida a estrés hídrico se activan dos grandes vías celulares complementarias: la primera depende de una fitohormona, el ácido abscísico (ABA); la segunda es independiente del ABA.

El ABA se descubrió por su función activadora de la abscisión o caída de las hojas. Su síntesis en las plantas suele estar desencadenada por un período de sequía. Esta reacción produce el cierre de los estomas (los poros de las hojas), por donde se pierde el agua durante la transpiración. En consecuencia, la planta transpira menos y economiza agua. El cierre

SELECCION ASISTIDA POR MARCADORES



LOS MARCADORES MOLECULARES mejoran la selección de variedades vegetales con caracteres de interés agronómico. En el ejemplo se parte de dos variedades de arroz: una tolerante a la sequía (*a*) y otra de rendimiento elevado (*b*). Se representa sólo un cromosoma de los 12 que posee el arroz. Uno de los marcadores utilizados (*rojo*) está situado cerca de uno de los genes que codifican el carácter deseado, en este caso la tolerancia a la sequía (*negro*). El primer cruzamiento produce una generación de plantas con un cromosoma de cada parental (*c*). A continuación, el genoma obtenido se cruza con el del parental de alto rendimiento (retrocruzamiento, *d*); algunas de las plantas resultantes han eliminado una gran parte del genoma sin interés. Esta operación, repetida tres o cuatro veces, produce plantas dotadas a la vez de marcadores de la región de interés y de un máximo de marcadores (*azul*) de la variedad de alto rendimiento (*e*). Las plantas que presentan dos cromosomas con esas características (homocigotas) toleran la sequía y tienen un alto rendimiento (*f*).

CHRISTELLE FORZALE/*Pour la Science*

de los estomas frena también el intercambio de gases entre la planta y la atmósfera, con lo que se reduce la entrada de anhídrido carbónico (CO_2) del aire, necesario para la fotosíntesis.

Una fitohormona de tolerancia

El ABA activa factores de transcripción, proteínas que modifican la expresión de genes al fijarse en su ADN. Algunos de esos factores se unen a secuencias ABRE (de "elementos de respuesta al ABA", en inglés). Las secuencias DRE/CRT son reconocidas por otros factores de transcripción, con independencia de la fitohormona ABA. La respuesta de la planta a la escasez de agua, dependa o no del ABA, reduce la fotosíntesis, modifica el metabolismo de los azúcares y provoca la acumulación de osmolitos, moléculas que retienen el agua en las células por ósmosis: aminoácidos, azúcares (trehalosa o fructano), polioles como el manitol, o proteínas.

Se ha demostrado que la sobreexpresión de genes implicados en la señalización de la deshidratación celular o en la síntesis de osmolitos mejora la tolerancia de la planta al estrés hídrico. El equipo de Kazuko Yamaguchi-Shinozaki y Kazuo Shinozaki, de Tsukuba (Japón), ha destacado en *Arabidopsis* la importancia del gen que codifica el factor de transcripción DREB1A, que se une a una secuencia DRE/CRE. Pero en condiciones normales de cultivo, las plantas transgénicas que sobreexpresan ese gen de manera continuada (constitutiva) presentan un retraso del crecimiento. De ahí que los investigadores decidieran asociar al gen que codifica el factor DREB1A un promotor inducible, esto

es, una secuencia genética que sólo permitiera la expresión de ese gen, y en consecuencia de los genes diana del factor de transcripción, en caso de déficit de agua. Las plantas transgénicas obtenidas de ese modo son más tolerantes al estrés hídrico y crecen con normalidad.

Al haberse establecido la función del gen DREB1A, se están buscando ahora en las colecciones de variedades de arroz formas homólogas de ese gen, que se expresen con fuerza y rapidez ante la escasez de agua. Cuando se descubran, podrán utilizarse para seleccionar nuevas variedades de arroz tolerantes a ese tipo de estrés.

Daños producidos por la sal

Otro rasgo de interés es la tolerancia a un exceso de sal, ya que el 30 por ciento de los arrozales crecen bajo condiciones de salinidad. Esta situación se debe a menudo a la entrada de agua del mar en deltas desecados y supone una reducción media del rendimiento del 30 por ciento. La sal concentrada en el suelo retiene el agua, que de este modo queda menos accesible para la planta. De ahí que la respuesta inmediata del arroz al exceso de sal se asemeje a la producida por la sequía.

En una segunda fase tiene lugar un intercambio de iones. La célula vegetal sólo funciona bien con una concentración alta de potasio (K^+) y baja de sodio (Na^+). Cuando una planta se halla expuesta a un exceso de sal (NaCl), los iones sodio penetran pasivamente en la célula, como consecuencia del gradiente de concentración creado, a través de canales de la membrana normalmente utilizados por el potasio. La célula se carga entonces de sodio, hasta el punto de inhibir la actividad de numerosos enzimas vitales. Cuando una parte importante del sodio absorbido por las raíces alcanza las hojas del arroz, la planta termina muriendo.

¿A qué se debe la tolerancia de algunas variedades a la sal? Las membranas de las células vegetales poseen transportadores "antipuerto", proteínas que transportan activamente los iones sodio en contra del gradiente de concentración. Contrarrestan así el transporte pasivo, siempre que ciertos enzimas hayan creado un gradiente de protones (H^+) entre ambos lados de la membrana. En *Arabidopsis* se han identificado dos transportadores antipuerto: en la membrana plasmática, la proteína SOS1 (*Salt Overly Sensitive 1*); y en la membrana de la vacuola (una especie de bolsa intracelular), NHX1, un intercambiador de iones Na^+/H^+ específico de las células vegetales. El antipuerto SOS1 expulsa los iones sodio de la célula, mientras que el transportador NHX1 los almacena en la vacuola. Esta doble acción reduce la concentración de sodio en el citosol.

En 2004, el equipo de Hirohiko Hirochika, en Tsukuba, obtuvo un arroz transgénico en el que el gen que codifica NHX1 se hallaba sobreexpresado. Como resultado, la membrana de las vacuolas poseía una gran cantidad de transportadores NHX1. Los investigadores observaron que la variedad toleraba una elevada concentración de sal en el suelo. Es decir, cuanto más transportadores NHX1 posee la membrana vacuolar del arroz, más iones sodio puede almacenar en la vacuola, y más tolerante es la planta al exceso de sal.

Intercambiadores de iones

El equipo de Hong-Xuan Lin, en Shangai y Berkeley, descubrió en 2005 otro factor de resistencia al estrés salino. Ante un exceso de sal, la variedad tolerante Nona Bokra y la variedad sensible Koshihikari consiguen mantener una concentración aceptable de potasio en las células del tallo gracias a la intervención de un QTL (*Quantitative Trait Locus*), una zona cromosómica que controla un carácter cuantitativo.

Con ayuda de marcadores moleculares se aisló el QTL. Luego se identificó el gen responsable. Se trata del gen *HKT8*, que codifica un transportador de iones implicado en la liberación del sodio contenido en el xilema (el tejido conductor de la savia bruta) de las raíces. Esta función limita el transporte de sodio a los tallos y hojas, con lo que la concentración de potasio en estos órganos se estabiliza. La distinta tolerancia a la salinidad entre las dos variedades se debe a la diferente forma del gen *HKT8* en cada una de ellas. El alelo de la variedad Nona Bokra codifica una proteína con una mayor actividad de transporte que la de la variedad Koshihikari.

Además de la sequía y la salinidad del suelo, una tercera limitación importante en el cultivo del arroz corresponde a la inmersión provocada por las inundaciones. Afecta sobre todo a las regiones tropicales, a causa de los monzones. Se calcula que las pérdidas de producción de arroz asociadas a las inundaciones de los campos de cultivo ascienden a más de quinientos millones de euros al año.

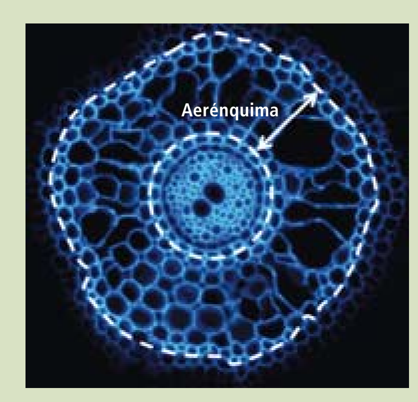
Tolerar la inundación

En el agua, los gases se difunden más lentamente que en el aire y el oxígeno se disuelve mal. Cuando una planta se halla sumergida corre el riesgo de asfixiarse. La respiración celular y la fotosíntesis disminuyen, lo que conlleva un déficit de energía y sustancias vitales, un efecto a menudo letal al cabo de una semana.

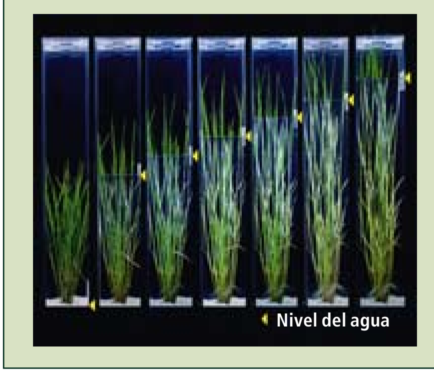
Las raíces y el tallo del arroz —como otras plantas que viven con "los pies" en el agua— están adaptados sin embargo a una inmersión parcial gracias al aerénquima, un tejido

ALARGARSE PARA FLOTAR MEJOR

Las raíces y el tallo del arroz poseen un tejido periférico con abundantes lagunas, el aerénquima (*línea discontinua blanca*), que permite la circulación del aire desde las hojas hasta las raíces. La planta resiste así la inmersión de sus raíces durante semanas.



En las variedades de arroz flotante, la parte superior de la planta se halla siempre por encima del nivel del agua (*abajo, flechas amarillas*). Investigadores japoneses han demostrado que estas plantas producen proteínas que estimulan el alargamiento de las regiones del tallo entre dos hojas consecutivas (entrenudos).



CHRISTOPHE PERIN (*arriba*); M. ASHIKARI (*abajo*)/*Pour la Science*

LA SITUACION EN ESPAÑA

España es el segundo país europeo productor de arroz después de Italia (con una superficie cultivada de casi 120.000 hectáreas y unas 900 mil toneladas producidas en 2009). En nuestro país el arroz se cultiva exclusivamente en régimen de regadío, en zonas húmedas de Sevilla, Tarragona y Valencia (márgenes de los ríos Guadalquivir, Ebro y Júcar, respectivamente) y del interior (Extremadura y pequeñas extensiones en Huesca, Murcia, Navarra y Zaragoza). Se cultivan variedades tanto de la subespecie *japonica*, de grano corto (arroz destinado sobre todo a consumo interno), como de la subespecie *indica*, de grano largo o semilargo (en su mayor parte para exportación).

Dentro de los problemas fitosanitarios que afectan al cultivo del arroz en España cabe destacar, por un lado, la plaga del taladrador del arroz (*Chilo simplex* o *supressalis*, Walk), un lepidóptero cuyas larvas perforan los tallos y penetran en ellos, destruyéndolos. Para combatirla, en el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias se están llevando a cabo experimentos de lucha biológica. Consiste ésta en la liberación de parásitos naturales y el empleo de feromonas, que permiten capturar los machos e impiden así la fecundación de las hembras. De este modo, se intenta evitar el impacto que produce la aplicación de productos químicos a los arrozales, sobre todo en las proximidades de parques naturales.

1. PLANTAS DE ARROZ BOMBA CONTROL (*c*) y de varias líneas con menor altura, en las que se redujo el contenido de giberelinas utilizando ARN de interferencia frente al gen *OsGA20ox1*.

Por otro lado, la piriculariosis representa una de las enfermedades más importantes en el cultivo de arroz en todo el mundo. La causa el hongo *Pyricularia oryzae* al producir una sustancia tóxica (piricularina) que inhibe el crecimiento de los tejidos del arroz y los desorganiza. En el proyecto Genblast (que agrupa a varios centros de investigación españoles y europeos), se pretende identificar genes que proporcionen resistencia a la enfermedad con objeto de incorporarlos a variedades de arroz adaptadas a las condiciones de cultivo europeas y evitar así la aplicación de fungicidas.

El encamado (caída de las plantas), provocado por los fuertes vientos, constituye un problema general en el cultivo del arroz, sobre todo en las variedades altas. Varios laboratorios españoles investigan la solución de ese problema mediante distintas estrategias. Nuestro grupo ha obtenido líneas de menor altura de la variedad Bomba (arroz muy apreciado por sus excelentes características culinarias, pero muy sensible al encamado). Para ello hemos reducido la expresión de un gen (*OsGA20ox1*) clave en la síntesis de giberelinas (GA), hormonas que controlan la altura de las plantas, mediante técnicas de ARN de interferencia.

Otro problema que también hemos abordado ha sido la pérdida de plántulas por asfixia durante las primeras etapas de crecimiento, tras la germinación bajo el agua. Las plántulas crecen más para tratar de "escapar" del agua produciendo más GA_1 (la GA activa). En el caso del cultivar Bomba ello es consecuencia de la síntesis de etileno inducida por la inmersión, mientras que en el caso del cultivar Senia es independiente de esa hormona.

Para evitar al mismo tiempo el problema de la asfixia de las plántulas y del encamado, se pretende aumentar el nivel de GA_1 sólo en las primeras fases de desarrollo, cuando las plantas están sumergidas, mediante la expresión de un gen de biosíntesis de giberelinas bajo control del promotor de un gen inducido por la inmersión (en el caso de la variedad Bomba, el del gen *OsACS5* de síntesis de etileno).

José Luis García Martínez
Instituto de Biología Molecular y Celular de Plantas "Eduardo Primo Yúfera", Valencia

2. CRECIMIENTO DE PLANTULAS de arroz al aire libre (*izquierda*) o sumergidas bajo una capa de 12 centímetros de agua (*derecha*). La inmersión induce la síntesis de giberelina activa (GA_1, hormona que controla la altura de las plantas) por *OsGA20ox*, mediada (cultivar Bomba) o no (cultivar Senia) por etileno. Las plántulas adquieren así mayor altura.

JOSE LUIS GARCIA MARTINEZ (*arriba*); DE "COMPARISON OF THE ROLE OF GIBBERELLINS AND ETHYLENE IN THE RESPONSE TO SUBMERGENCE OF TWO LOWLAND RICE CULTIVARS, SENIA AND BOMBA", POR V. DUBOIS, T. MORITZ Y J. L. GARCIA-MARTINEZ EN *J. PLANT PHYSIOL.* 2010, EN PRENSA (*abajo*)

con amplios espacios vacíos conectados por puentes de células. De este modo, cuando emerge la parte aérea, ésta suministra aire a las raíces, que así pueden desarrollarse en un suelo inundado.

Algunas variedades, como el arroz flotante, resisten la inmersión total. Sus entrenudos, las partes del tallo situadas entre dos nudos o zonas donde nacen las hojas, se alargan por la acción de una fitohormona, el etileno. En consecuencia, a medida que asciende el nivel de agua, la parte alta del tallo y las hojas permanecen al aire libre.

Otra hormona vegetal, la giberelina, promueve el alargamiento de los entrenudos al inhibir las proteínas que impiden este crecimiento. En 2009, el equipo de Motoyuki Ashikari, de la Universidad de Nagoya, descubrió el mecanismo que asocia el etileno al alargamiento de los entrenudos. Describió la función de dos factores de transcripción cuya síntesis es activada por el etileno (factores ERF, de *Ethylene-Response Factor*): SNORKEL 1 y 2 (SK1 y SK2). En una variedad de arroz flotante, la C9285, esas proteínas se sintetizan como consecuencia de la acumulación de etileno durante la inmersión. Las proteínas desencadenan a su vez la producción de una forma activa de giberelina, GA_1, lo que da lugar al alargamiento de los entrenudos. La variedad no flotante Taichung 65 carece de los genes *SK1* y *SK2*, por lo que no soporta la inmersión.

Otras variedades utilizan una estrategia de quiescencia. Al tiempo que producen energía por fermentación de los azúcares, dejan de crecer. Ello les permite economizar sus recursos y volver a iniciar un desarrollo normal cuando desciende el nivel del agua. Sin embargo, el balance energético de esa adaptación es negativo y las plantas raramente sobreviven más de dos semanas.

En 2006, investigadores de la Universidad de California y del IRRI identificaron uno de los genes en juego, *Sub1A*, que también codifica un factor de transcripción de tipo ERF. El análisis comparativo de una decena de variedades ha puesto de manifiesto la existencia de una forma particular del gen (*Sub1A-1*) en las variedades tolerantes, como la FR13A. La introducción por transgénesis del alelo *Sub1A-1* en una variedad sensible ha confirmado que su mera presencia confiere a la planta tolerancia a la inmersión. La proteína codificada por este alelo inhibe la acción de las giberelinas, lo que impide el alargamiento de los entrenudos. La planta deja de crecer y entra en quiescencia.

Vemos pues que en diferentes variedades de arroz, el control ejercido por diversas proteínas de la familia ERF sobre la vía de señalización de las giberelinas lleva a comportamientos diferentes frente a la inmersión. En un caso, estimulando el alargamiento de los entrenudos y en otro, reduciendo la actividad metabólica.

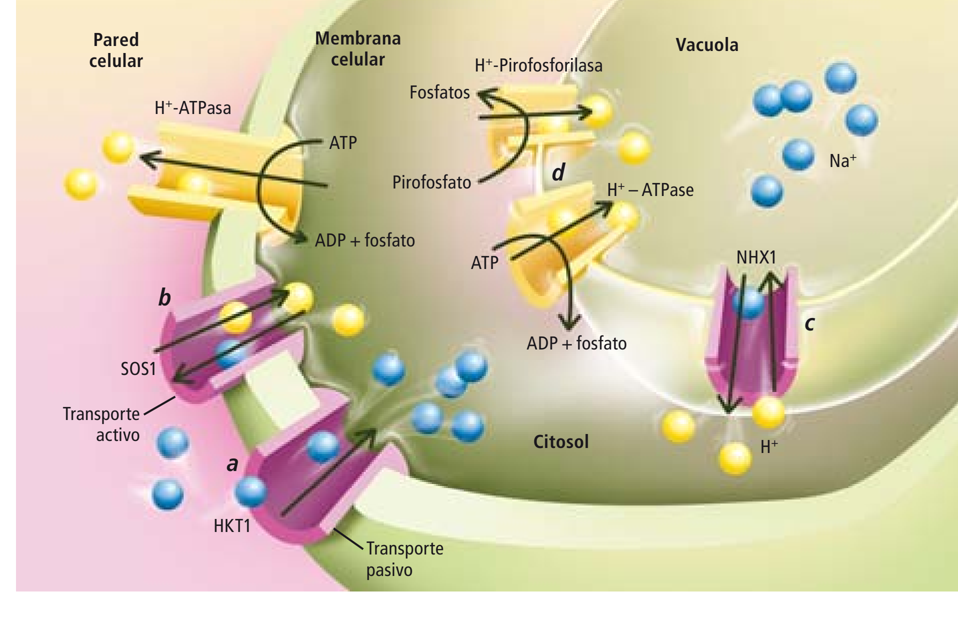
En sólo tres años, se ha logrado introducir el gen *Sub1A-1*, mediante selección asistida por marcadores, a partir del cruzamiento de una variedad derivada de FR13A con la variedad sensible Swarna, ampliamente cultivada en regiones sometidas a inundaciones. La nueva planta, Swarna-Sub1, posee un rendimiento por lo menos dos veces superior a la variedad Swarna tras diez días de inmersión. La precisión que ofrece la selección asistida por marcadores ha permitido producir plantas idénticas, en todos los otros aspectos, a la variedad Swarna. El nuevo arroz ha sido aceptado por los agricultores que lo han ensayado.

El IRRI, que ha llevado a cabo el proyecto, planea distribuir las nuevas semillas a lo largo de 2010. Las semillas de otras variedades tolerantes a la inmersión y de buen rendimiento, seleccionadas en Filipinas, en Laos y Bangladesh, deberían seguir el mismo camino.

Atajar el problema de raíz

Los estudios que hemos mencionado trataban de propiedades celulares que podían conferir tolerancia a la sequía, la sal o la inmersión. Sin embargo, resulta también pertinente considerar las plantas a escala del organismo entero, teniendo en cuenta sus características morfológicas. Así, una planta dotada de un sistema radicular profundo y ramificado utiliza mejor los recursos de agua disponible en el suelo que una planta con raíces superficiales. Las variedades de arroz de secano deben extraer el agua del suelo a una gran profundidad. Para ello se sirven de un sistema radicular que alcanza, en ciertas condiciones, un metro de longitud; ese valor contrasta con los 20 centímetros de media en los arroces de riego, que crecen en un suelo saturado de agua.

Nuestro equipo, en Montpellier, está interesado en ese carácter morfológico. Se preten-



3. LAS BOMBAS IONICAS impiden que la concentración de iones sodio (Na^+, *azul*) en las células aumente hasta niveles tóxicos cuando el arroz crece en suelos salinos. Las bombas se hallan ancladas en la membrana celular y la membrana de la vacuola, una bolsa intracelular que puede llenarse de agua y sal. Cuando el suelo es salino, los iones sodio entran pasivamente en la célula, sobre todo por un canal que suelen utilizar los iones potasio (HKT1) (*a*). En las variedades tolerantes a la sal, las bombas de la membrana celular (SOS1) expulsan activamente los iones sodio (*b*), mientras que otros transportadores (NHX1), situados en la membrana vacuolar, los almacenan en la vacuola (*c*), donde no pueden ejercer sus efectos tóxicos. Este transporte activo se basa en la diferencia de potencial de los protones (H^+, *amarillo*) creado entre ambos lados de las dos membranas (*d*). El transporte de sodio depende del transporte de los iones H^+, que entran cuando los iones Na^+ salen, o al revés.

CHRISTELLE FORZALE/*Pour la Science*

de desarrollar, mediante selección asistida por marcadores, nuevas variedades de arroz con un sistema radicular profundo. Sin embargo, la arquitectura radicular de las plantas de una misma variedad cambia según las características locales del suelo, un medio heterogéneo. Un fenómeno tan variable no puede asociarse fácilmente a marcadores moleculares. Para superar esta dificultad, se determina directamente la función de los genes que controlan el enraizamiento y la ramificación del sistema radicular mediante técnicas de genómica funcional.

Nuestro grupo trata de identificar las proteínas que activan o inhiben los genes implicados en el funcionamiento del meristemo radicular, la zona celular desde la que se diferencian los tejidos radiculares, y la formación de nuevas raíces. Se sabe que el gen *CROWN ROOTLESS1* controla el desarrollo de raíces nodales, que constituyen la mayor parte del sistema radicular en el arroz y los cereales. Para conocer su modo de acción, estamos investigando las relaciones entre los alelos de ese gen y las características arquitectónicas del sistema radicular en diversas variedades de arroz.

Selección y transgénesis

Una vez identificados los alelos responsables de la morfología del sistema radicular, será posible asociarlos a marcadores moleculares. Podremos entonces transferirlos a variedades receptoras con ayuda de la selección asistida por marcadores. Aunque las variedades así obtenidas suelen tener mejor aceptación que las variedades transgénicas, la transgénesis constituye todavía una técnica indispensable para validar la función de los genes en el laboratorio. Además, es el único método para transferir genes de interés agronómico entre especies. Mediante la transgénesis se modifica también el nivel de expresión de genes que codifican proteínas responsables de la tolerancia a varios tipos de estrés en una misma planta. En 2006 el equipo de Lizhong Xiong, de la Universidad de Agricultura de Wuhan, describió que la sobreexpresión de un solo factor de transcripción, la proteína SNAC1, aumenta a la vez la tolerancia a la salinidad y a la sequía en condiciones de laboratorio. Diversos análisis demostraron que esa proteína promovería la expresión de varios genes relacionados con la tolerancia a ambos tipos de estrés.

Es probable que en el futuro se combinen la selección asistida por marcadores y la transgénesis para crear nuevas variedades de plantas cultivadas, como ya se ha empezado a hacer en América, Asia y Africa. Esperamos que ambas estrategias ayuden a hacer frente al doble desafío del crecimiento demográfico mundial y el cambio climático.

Bibliografía complementaria

GRAIN DE RIZ, GRAIN DE VIE. M. Jeanguyot y N. Ahmadi. Ed. CIRAD-Magellan & Cie, 2002.

LE RIZ, ENJEUX ECOLOGIQUES ET ECONOMIQUES. G. Trébuil y M. Hossain. Ed. Belin; París, 2004.

SUB1A IS AN ETHYLENE-RESPONSE FACTOR-LIKE GENE THAT CONFERS SUBMERGENCE TOLERANCE TO RICE. K. Xu y col. en *Nature*, vol. 442, págs. 705-708; 2006.

MOLECULAR GENETIC OF RICE ROOT DEVELOPMENT. A. Rebouillat y col. en *Rice*, vol. 2, págs. 15-34. Springer; Nueva York, 2009.

RICE ROOT GENETIC ARCHITECTURE: META-ANALYSIS FROM A DROUGHT QTL DATABASE. B. Courtois y col. en *Rice*, vol. 2, págs. 115-128. Springer; Nueva York, 2009.

THE ETHYLENE RESPONSE FACTORS SNORKEL1 AND SNORKEL2 ALLOW RICE TO ADAPT TO DEEP WATER. Y. Hattori y col. en *Nature*, vol. 460, págs. 1026-1030; 2009.

Las reformas del mercado, veinte años después

Las fuerzas económicas, políticas y culturales han dado un impulso a Polonia, pero han sido insuficientes en Rusia

Jeffrey D. Sachs





He tenido el placer de volver a visitar hace poco Varsovia y San Petersburgo, dos decenios después del comienzo de las reformas del mercado en las que participé como asesor económico. Ambas ciudades, venerables y orgullosas capitales, han superado el colapso tumultuoso de la era soviética. Las tiendas estaban llenas, refulgían los tesoros arquitectónicos y abundaban los turistas, nacionales y extranjeros.

Aun así, las diferencias entre las ciudades también eran patentes. Varsovia ha experimentado un *boom* de la construcción. Allí se han levantado impresionantes torres de negocios a pesar de la ralentización económica en la Europa occidental. San Petersburgo se vanagloria de los tesoros arquitectónicos del pasado, pero en el presente muestra mucho menos dinamismo.

Debido a que entre finales de los ochenta y principios de los noventa trabajé en Europa del Este y la antigua Unión Soviética, a menudo me preguntan el motivo del mayor arraigo del mercado en unos lugares que en otros. La respuesta, que reside en la compleja interacción de la geografía, la política, la historia y la cultura, merece un análisis.

La frontera soviética representa la línea que marca las mayores diferencias. Países como Polonia, Hungría, la República Checa y Eslovaquia —que habían permanecido fuera de la Unión Soviética pero bajo su dominio— ansiaban formar parte de la Unión Europea. Ese proceso de entrada determinó de forma positiva la orientación de sus políticas internas y reformas legales, y propició las inversiones procedentes de Alemania, Italia, Austria y los países escandinavos.

Por el contrario, Rusia no se lanzó a los brazos de Europa, sino que luchó con su pasado y futuro propios. Tras el desplome del sistema soviético, no hubo en Rusia consenso sobre un nuevo modelo económico y político que lo reemplazara. El arte de gobernar del país siguió guiándose por la práctica de las normas burocráticas de siglos atrás, y se miraba con recelo las fuerzas del mercado.

La cultura también ha definido la dinámica de la reforma. Como los polacos mantienen un escepticismo saludable hacia el poder del estado, Polonia desarrolló una democracia vigorosa y competitiva después de 1989. La sociedad civil criticó enérgicamente la corrupción estatal y ayudó a contenerla. En la última evaluación sobre corrupción del sector público realizada en 180 estados por la organización Transparencia Internacional, Polonia ocupa el puesto 49 de los menos corruptos. Pese a lo moderado de la calificación, representa un buen resultado para una democracia joven con ingresos medios, nacida tras decenios de gobierno comunista.

En Rusia, por el contrario, la corrupción ha proliferado durante los últimos veinte años y la población demuestra una escasa capacidad para frenarla. Las instituciones de la sociedad civil, reprimidas por siglos de zarismo y obliteradas por la brutalidad del estado de la era soviética, se mantienen débiles. Dado que el control de la corrupción era tan endeble, a mediados de los noventa la vasta riqueza del estado —especialmente en petróleo, gas y minerales— pasó a manos privadas. Aparecieron así los oligarcas de la nueva Rusia. Años más tarde, los poderosos burócratas volvieron a arrebatar el control de muchos de esos activos. El ascenso y caída de los oligarcas fueron turbios, sin la transparencia necesaria para una economía de mercado saludable. No sorprende que Rusia aterrice en un pésimo puesto 146 de la lista de corrupción de Transparencia Internacional.

Una de las partes más tristes de la historia representó la ausencia de apoyo de George H. W. Bush y Bill Clinton a los abrumados reformadores en los momentos cruciales. He llegado a creer que algunos altos funcionarios estadounidenses no reaccionaron ante la creciente corrupción y se mantuvieron pasivos, en vez de ayudar a los reformadores a contenerla. Después de todo, EE.UU. presenta sus propios problemas de corrupción; ocupa un deslucido puesto 19 en la lista de Transparencia Internacional, por debajo de la mayor parte de países con altos ingresos.

Me fui de San Petersburgo con la sensación de que en esa espléndida ciudad y en toda Rusia todavía era posible dar un gran impulso a la reforma económica. La alta preparación y los conocimientos técnicos de su población no se traducen en una suficiente creación de empresas ni en ingresos más elevados. La burocracia conserva su control tradicional, incluso mantiene el sistema de registro interno de la época de los zares que limita la movilidad de los rusos entre una ciudad y otra. Asimismo, se entorpece el funcionamiento de los negocios pequeños con reglamentos arbitrarios. Es indudable el avance de Rusia en cuanto a liberalización política y económica, pero un país con tanto talento todavía debe sacar provecho de lo mejor de su herencia cultural, sus capacidades técnicas y las ventajas de una mayor libertad económica.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

Abejas polinizadoras de dragoncillos

Pablo Vargas Gómez

Pocas plantas han adquirido una flor tan hermética como la de los dragoncillos (especies del género *Antirrhinum*). De noche y de día, con lluvia o a pleno sol, cualquier flor de dragoncillo oculta sus órganos sexuales (anteras y pistilos) en una corola cuya estructura se asemeja a una cajita bien cerrada por una tapa. Gracias a su fuerza, las abejas consiguen abrirla y facilitan la polinización. De hecho, abejas de distintos tamaños pueden llegar al fondo de las flores, donde cosechan el preciado néctar. Transportan el polen a los estigmas y producen así la fecundación. A pesar de las limitaciones impuestas por la complejidad de las flores y la especificidad de los polinizadores, la estrecha relación entre abejas y dragoncillos ha resultado sumamente provechosa para ambos. La existencia en el Mediterráneo de 25 especies de dragoncillos responde a procesos evolutivos acaecidos en los últimos dos millones de años. La península Ibérica, con 23 especies, constituye el centro de diferenciación de los dragoncillos y representa, asimismo, un centro de diversidad de abejas.

¿Por qué una flor tan compleja impide la entrada a otros insectos polinizadores de plantas con flores (mariposas, polillas, moscas) y condiciona así su éxito reproductor y, por tanto, su supervivencia, a un solo tipo de insectos? Las líneas evolutivas en las plantas culminan muchas veces en flores especialistas y flores generalistas, ambas estrategias con éxito según las condiciones ambientales. Las flores de los dragoncillos han elegido el camino de la especialización, aunque no esté desprovista de riesgos. Las abejas abundan allí donde habitan los dragoncillos. ¿Qué sucedería si éstas desaparecieran? En tan sólo unos años, los dragoncillos sucumbirían. De hecho, la dependencia de los dragoncillos hacia las abejas constituye una de las relaciones más estrechas establecidas por las flores desde el origen del clima mediterráneo (hace alrededor de tres millones de años).







ABEJAS POLINIZANDO tres especies ibéricas de dragoncillos. Un abejorro (*Bombus hortorum*) abre la flor del dragoncillo cantábrico (*Antirrhinum braun-blanquetii*) (*a*). La abeja de la miel (*Apis mellifera*) se impregna de polen del dragoncillo del cabo de Gata (*Antirrhinum charidemi*) (*b*). La abeja carpintera (*Xylocopa violacea*), en contacto con las anteras de la flor del dragoncillo del centro (*Antirrhinum grosii*) (*c*).



EN LA IMAGEN DE FONDO, *ANTIRRHINUM CHARIDEMI*
FOTOGRAFIAS CORTESIA DEL AUTOR

SECUENCIA DE APROXIMACION de un abejorro (*Anthophora dispar*) a una flor del dragoncillo del cabo de Gata (*Antirrhinum charidemi*). Las abejas deben aprender a entrar en la compleja flor. Parece que esta abeja carece de experiencia, ya que palpa la corola en un punto alejado de la entrada (*imagen central*).

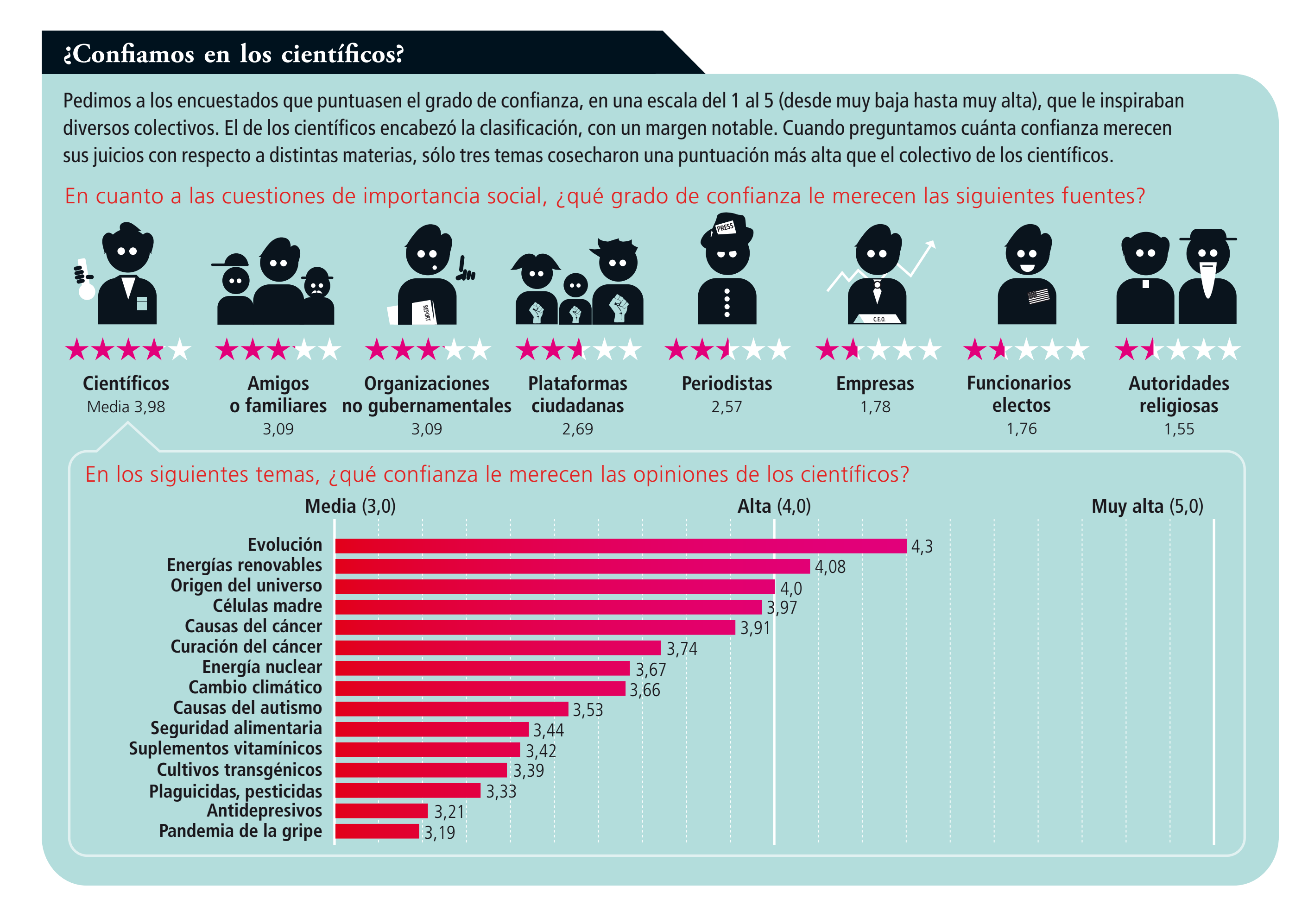
ENCUESTA EXCLUSIVA

¿Confiamos en la ciencia?

La encuesta internacional realizada por SCIENTIFIC AMERICAN indica que el público tiene aún fe en los expertos, con algunas importantes objeciones

Ha sido un año borrascoso para los científicos. A raíz de la filtración de los correos electrónicos del "Climategate", se les tildó de censuradores. La levedad de la gripe H1N1 dio pie para acusar a la OMS de exagerar el peligro y ayudar así a las ventas de grandes compañías farmacéuticas. En Harvard, una comisión inspectora descubrió escandalosas carencias en los datos de un afamado profesor. Por el horizonte asoman graves decisiones políticas sobre el clima, la energía, la salud y la tecnología. Resulta forzoso preguntar: ¿Cuánto han mermado estos acontecimientos la fe del público en la ciencia? ¿Confía todavía la gente en los científicos?

Para averiguarlo, *Scientific American*, en asociación con su publicación hermana *Nature*, propuso a sus lectores una encuesta en línea. Las sedes de *Nature* y de *Scientific American* en la Red, junto con las de sus ediciones internacionales, entre ellas *Investigación y Ciencia*, recibieron más de 21.000 respuestas. Como era de esperar, se trataba de un colectivo científicamente culto, un 19 por ciento declaró poseer un doctorado, y presto a colaborar. Pero sus modos de pensar discreparon ampliamente en cuestiones concretas (clima, evolución, tecnología), dependiendo también de que residieran en EE.UU., Europa o Asia.



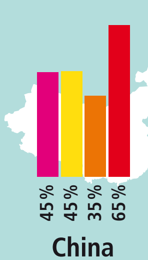
GRAFICOS DE ARNO GHELFI

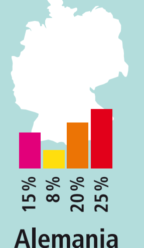
Ciencia y política: la opinión en tres países

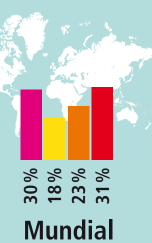
¿Deben implicarse los científicos en la política? Existe una amplia diferencia de opinión, según el origen del encuestado. Alemania, cuya canciller posee un doctorado en química cuántica, parece aprobar que sus científicos desempeñen roles políticos de altura. Pero no así en China. Aunque casi todos sus dirigentes son ingenieros, los chinos se mostraron menos favorables a la presencia de científicos en la vida política que sus homólogos alemanes o estadounidenses.

Porcentaje de respuestas acordes con los siguientes asertos

- Los científicos deberían explicar lo que dice la ciencia pero evitar el activismo
- Los científicos deberían mantenerse al margen de la política
- Los científicos son quienes mejor saben lo que es bueno para la sociedad
- Los científicos deben considerar la voluntad de la sociedad, aunque crean que los ciudadanos están equivocados o no entienden bien su trabajo



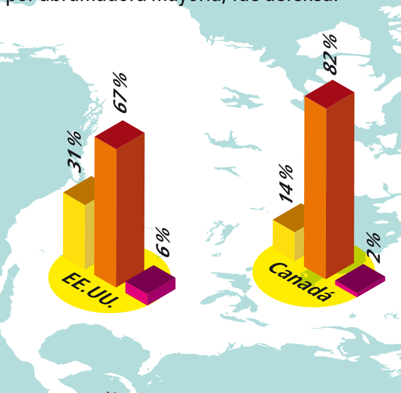


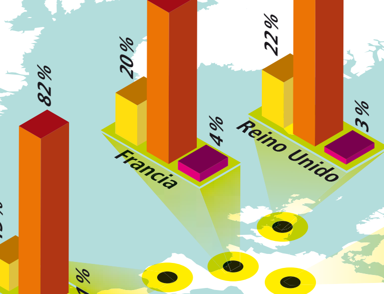


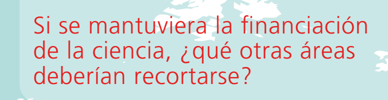
	EE.UU.	China	Alemania	Mundial
Los científicos deberían explicar lo que dice la ciencia pero evitar el activismo	40 %	45 %	15 %	30 %
Los científicos deberían mantenerse al margen de la política	17 %	45 %	8 %	18 %
Los científicos son quienes mejor saben lo que es bueno para la sociedad	21 %	35 %	20 %	23 %
Los científicos deben considerar la voluntad de la sociedad...	26 %	65 %	25 %	31 %

Armas, no: laboratorios

Más del setenta por ciento de las respuestas confirmaron que en tiempos de austeridad la inversión en ciencia no debe menguar. A la pregunta, ¿qué otras áreas deberían recortarse? la respuesta, por abrumadora mayoría, fue defensa.



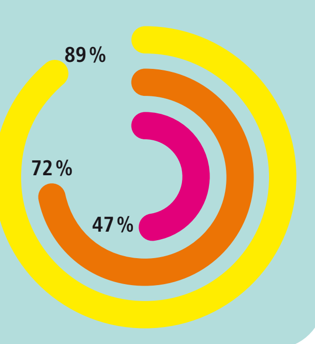


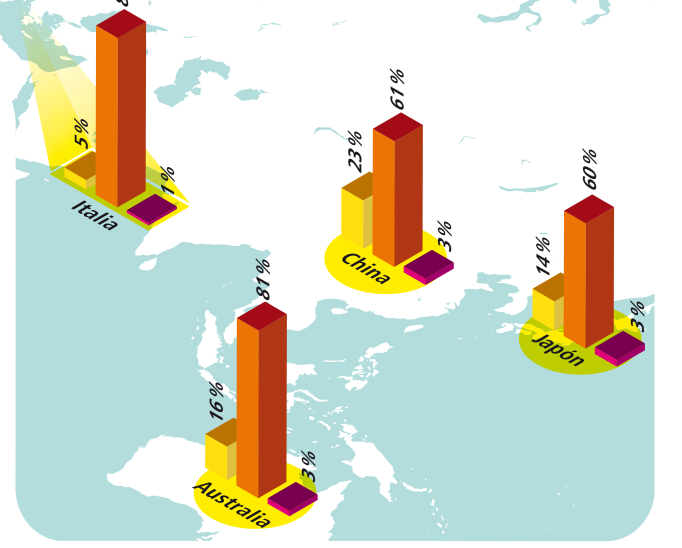


¿Es rentable invertir en investigación científica?

Respuestas concordantes con los siguientes asertos:

- La inversión en ciencia básica no tiene rentabilidad económica inmediata, pero sienta las bases para el crecimiento futuro
- La inversión en ciencia básica es una de las mejores formas de estimular la economía y la creación de empleo
- La investigación científica no conduce necesariamente al crecimiento económico; debería apoyarse por otras razones





Tecnofobias

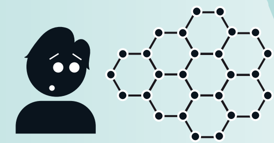
La tecnología puede tener consecuencias indeseables. Hemos preguntado a qué desarrollos habría que poner freno o, cuando menos, vigilar de cerca. Para nuestra sorpresa, la energía nuclear preocupa más que la vida artificial, las células pluripotentes o los cultivos transgénicos.

47 %



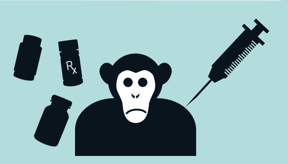
La energía nuclear debería abandonarse y reemplazarse por otras fuentes de energía limpia

26 %



El gobierno debería empezar a actuar para proteger a la población de los posibles riesgos de la nanotecnología

23 %



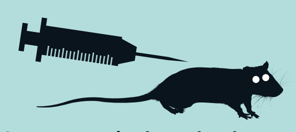
No apruebo, bajo ningún concepto, la investigación médica con chimpancés

22 %



Los transgénicos conllevan riesgos ambientales y sanitarios inaceptables. No deberían cultivarse

12 %



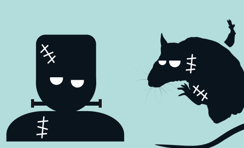
No apruebo, bajo ningún concepto, las investigaciones médicas con ningún tipo de mamífero

8 %



No apruebo, bajo ningún concepto, las investigaciones con embriones humanos

7 %



Debería prohibirse la investigación sobre organismos artificiales hasta que se demuestre su seguridad

Europa y EE.UU.: diferencias

Las opiniones de europeos y estadounidenses sobre la tecnología difieren nítidamente. En Europa se expresa mayor desconfianza hacia la energía nuclear y los cultivos transgénicos que en EE.UU. (Aquí, Europa significa Alemania, Bélgica, España, Francia e Italia, pero no Reino Unido, donde la opinión es más pareja a la estadounidense.) La nanotecnología es una gran desconocida por doquier. Los europeos también muestran desconfianza en los informes sobre la pandemia gripal (*derecha*).

¿Hasta qué punto le inquietan los riesgos asociados con la energía nuclear?

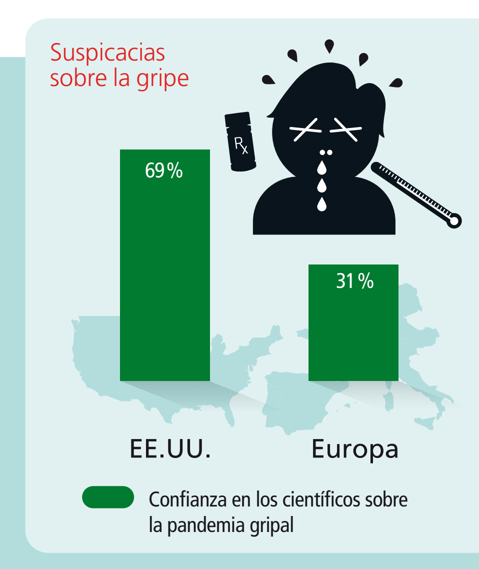
	EE.UU.	Europa
Mucho	18 %	66 %
Poco	56 %	27 %
Nada	24 %	5 %
No lo sé	2 %	2 %

¿Hasta qué punto le inquietan los riesgos asociados con la nanotecnología?

	EE.UU.	Europa
Mucho	28 %	23 %
Poco	10 %	11 %
Nada	27 %	33 %
No lo sé	36 %	33 %

¿Hasta qué punto le inquietan los riesgos asociados con los cultivos transgénicos?

	EE.UU.	Europa
Mucho	13 %	27 %
Poco	34 %	48 %
Nada	53 %	26 %



El 11 de junio de 2009, la OMS, con sede en Ginebra, declaró que la cepa gripal H1N1 era una pandemia y confirmó lo que los virólogos sabían ya: que el virus de la gripe se había extendido por todo el mundo. Los gobiernos invirtieron miles de millones de euros en vacunas y fármacos antivíricos, un arsenal presto para combatir un virus que, por fortuna, resultó poco agresivo.

Un año después, dos estudios europeos sostenían que la decisión de la OMS estuvo influida por conflictos de interés. En 2004, un comité de la OMS recomendó que los gobiernos almacenasen fármacos antivíricos en tiempos de pandemia; posteriormente se halló que los científicos de aquel comité tenían vínculos con compañías farmacéuticas. La OMS se ha negado a facilitar los nombres de los miembros del comité que el año pasado recomendó la declaración de pandemia, lo que hizo sospechar también su posible conexión con la industria. En Europa, la disputa mereció una gran atención mediática. El *Daily Mail*, un diario sensacionalista británico, declaraba: "Pandemia inexistente: Las multinacionales incitaron a la OMS a exagerar la amenaza de la gripe de origen porcino". En EE.UU. la controversia apenas se mencionó.

En Europa, el revuelo parece haber influido de forma notable en la opinión. Casi el 70 por ciento de las respuestas remitidas en EE.UU. expresaba confianza en la valoración de los científicos sobre la pandemia gripal; en Europa, solamente el 31 por ciento. Esas cifras señalan la mayor discrepancia entre EE.UU. y Europa de todas las cuestiones formuladas en la encuesta.

Negación del cambio climático

Numerosas encuestas señalan un descenso del porcentaje de estadounidenses que creen en la influencia humana sobre el cambio climático. Pero los datos indican que EE.UU. no es el país más contumaz a este respecto (lo son Francia, Japón y Australia). El modo de pensar, empero, parece estar variando en sentido contrario.

Entre los encuestados que habían cambiado de opinión durante el año pasado, los que tenían una mayor certeza de la influencia humana en el clima eran tres veces más que los que expresaron una menor certeza.

49 % 37 % 14 % 2,7 — EE.UU.
46 % 41 % 12 % 3,4 — Canadá
17 % 20 % 63 % 3,2 — Brasil
53 % 36 % 11 % 3,3 — España
53 % 29 % 18 % 1,6
60 % 27 % 13 % 2,0
59 % 31 % 10 % 3,0
Reino Unido, Francia, Alemania, Italia
44 % 46 % 12 % 3,8
49 % 37 % 14 % 2,6 — Australia
23 % 16 % 61 % 3,8 — China
48 % 30 % 22 % 1,3 — Japón

En el transcurso de los últimos meses, ¿ha modificado su visión sobre el cambio climático?

Mundial: 46 % No he cambiado de opinión; 40 % Estoy más convencido de que los humanos estamos alterando el clima; 14 % Dudo más de que la actividad humana esté afectando al clima; 2,9 Razón entre "más convencidos" y "más dudosos"

Las emisiones de dióxido de carbono acidifican los océanos. Ello pone en peligro el crecimiento y la reproducción de las especies, desde el plancton hasta los calamares

MARAH J. HARDT Y CARL SAFINA



La vida oceánica,

FOTOGRAFIA DE JAMIE CHUNG



amenazada

CONCEPTOS BASICOS

- El agua marina está acidificándose en todo el mundo, pues los océanos absorben cada vez más dióxido de carbono de la atmósfera.
- Los esfuerzos realizados por copépodos, caracoles, erizos de mar y ofiuras para equilibrar el cambio de *p*H en su organismo perjudica su capacidad de reproducirse y crecer. Seguramente un gran número de especies no lograrán la adaptación genética a la acidificación del océano, porque el cambio se está produciendo demasiado deprisa.
- Al quedar afectadas las especies, la red trófica marina puede desorganizarse; es necesaria la acción humana para reducir una ulterior acidificación.

"Espermatozoides lentos... eso sí es un problema" —observó Jonathan Havenhand—. "Significa menos huevos fecundados, menos crías y poblaciones más reducidas." Recorríamos juntos una tortuosa carretera a lo largo de la costa resplandeciente del norte de España para asistir a un simposio internacional sobre los efectos del cambio climático y del aumento de dióxido de carbono atmosférico sobre los océanos mundiales. Como investigadores, nos preocupaban las repercusiones, a menudo infravaloradas, de la alteración química del océano sobre las células, los tejidos y los órganos de las especies marinas. Havenhand había demostrado, en experimentos de laboratorio realizados en la Universidad de Gotemburgo, que dichos cambios afectaban gravemente la estrategia de supervivencia más fundamental: la reproducción.

La acidificación del océano (por el aumento del dióxido de carbono, que reacciona con el agua para formar ácido carbónico) se ha calificado como "el otro problema del CO_2". A medida que el agua se torna más ácida, los corales y animales tales como almejas y mejillones tienen dificultades para construir sus esqueletos y conchas. Pero las consecuencias son aún peores: la acidez puede interferir en funciones corporales básicas de todos los animales marinos, posean o no concha. Al alterar procesos tan fundamentales como el crecimiento y la reproducción, la acidificación del océano pone en peligro la salud de los animales e incluso la supervivencia de las especies. Debemos reaccionar a tiempo y mitigar la acidificación antes de que resulte dañada de forma irreparable la cadena trófica de la que dependen los océanos... y las personas.

Cambio rápido en el mar

La interacción del océano con el CO_2 suaviza algunos de los efectos climáticos del gas. La concentración atmosférica de CO_2 alcanza casi 390 partes por millón (ppm). Pero si los océanos no captaran hasta 30 millones de toneladas diarias del gas, ese valor sería aún mayor. Los mares del mundo han absorbido alrededor de un tercio de todo el CO_2 liberado por las actividades humanas. Este "sumidero" reduce el calentamiento global, pero a costa de acidificar el mar. Robert H. Byrne, de la Universidad de Florida Meridional, ha demostrado que sólo en los últimos 15 años, la acidez de los 100 metros superficiales del océano Pacífico que se extiende desde Hawai hasta Alaska ha aumentado un 6 por ciento. En todo el planeta, el *p*H promedio de la capa superficial del océano ha disminuido 0,12 unidades (ha llegado a un valor aproximado de 8,1) desde el inicio de la revolución industrial.

¿QUE ES EL *p*H?

El *p*H de una disolución está determinado por la concentración de hidrogeniones (H^+) en la misma. Un *p*H de 7,0 es neutro; un *p*H inferior a ese valor es ácido; y un *p*H superior es básico o alcalino. "Acidificación" significa un descenso del *p*H en cualquier lugar de la escala.

Valor de *p*H
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
Más ácido
Neutro
Más básico
Mayor concentración de H^+
Menor concentración de H^+

EL ACIDO EN EL OCEANO

El océano está formado por capas de agua relativamente estables con una combinación determinada de salinidad y temperatura (*izquierda*). La luz solar que llega a la superficie cede energía al fitoplancton (la base de la cadena trófica), que en último término sustenta a toda la vida marina. Entre los animales marinos se cuentan los copépodos, que migran entre capas de agua y sirven de alimento a animales de las aguas profundas (*centro, izquierda*). A medida que aumenta el CO_2 atmosférico, lo hace también la acidez del agua (*centro, derecha*), un fenómeno que ya se ha verificado en los océanos (*derecha*). Los experimentos indican que la acidez perjudicará a los organismos marinos en diversas profundidades.

ZONA ILUMINADA
200 m*
ZONA DE PENUMBRA
1000 m
ZONA OSCURA
4000 m
ZONA ABISAL
Más cálido
Más frío

*Las profundidades son aproximadas y varían según las regiones

CAPAS

El CO_2 atmosférico reduce de forma inmediata el *p*H de la capa superficial (iluminada), y la mezcla entre capas provoca el descenso gradual del *p*H en profundidad, aunque en menor grado. Sin embargo, los animales de las capas más profundas son más vulnerables a los pequeños cambios.

50 m
100 m
200 m
Migración de los copépodos
Ocaso
Orto
Tiempo →

CADENA TROFICA

Cada noche, una multitud de copépodos, unos crustáceos diminutos, ascienden hacia la capa iluminada para alimentarse del zooplancton, formado por animales más pequeños todavía. Al salir el sol descienden; sirven entonces de alimento a especies de mayor profundidad. El cambio de *p*H podría afectar su supervivencia, lo que alteraría la cadena trófica.

GEORGE RETSECK (*ilustración principal*)

Este cambio puede parecer ínfimo, pero puesto que la escala del *p*H es logarítmica, supone un 30 por ciento de aumento de la acidez. El *p*H expresa la concentración de iones hidrógeno (o hidrogeniones, H^+) en disolución. Un valor de 7,0 corresponde a un *p*H neutro; valores inferiores, a un *p*H ácido, y valores superiores, a un *p*H básico o alcalino. Aunque un *p*H de 8,1 representa una ligera alcalinidad, la tendencia a la reducción constituye acidificación. La vida marina no ha experimentado un cambio tan rápido en millones de años. Y los estudios paleontológicos demuestran que cambios de esa magnitud en el pasado se asociaron a una degradación generalizada de la vida marina. Hace unos 250 millones de años, las erupciones volcánicas a gran escala y la liberación de metano habrían llegado a duplicar la cantidad de CO_2 atmosférico, lo que causó la mayor extinción en masa de todos los tiempos. Desaparecieron más del 90 por ciento de las especies marinas [*véase* "Impacto desde las profundidades", de Peter D. Ward; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 2006]. Durante cuatro o cinco millones de años persistió un océano muy diferente, con un número reducido de especies.

Si mantenemos las tasas actuales de emisión de gases de efecto invernadero, se estima que el CO_2 atmosférico alcanzará 500 ppm hacia 2050, y 800 ppm hacia 2100. El *p*H del océano superficial podría caer hasta 7,8 o 7,7, lo que supone un aumento de la acidez de hasta un 150 por ciento, en comparación con la época preindustrial.

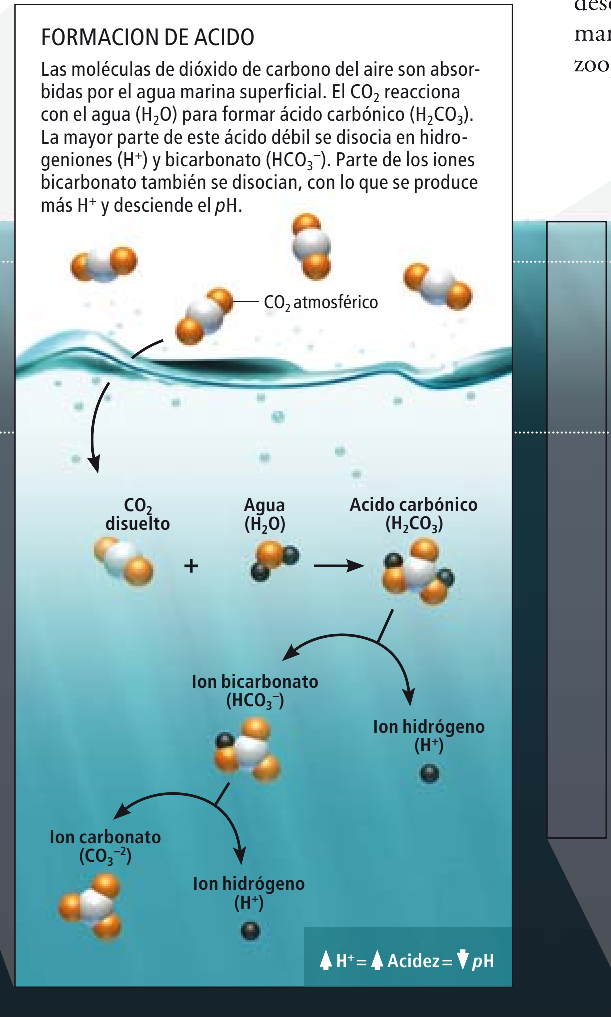
Muchos consideran el océano como una gigantesca piscina de agua. Pero el océano guarda mayor semejanza con un pastel de capas; cada capa se caracteriza por una determinada combinación de salinidad y temperatura. Las aguas más cálidas y menos saladas se extienden desde la superficie hasta unos 50 a 200 metros, a veces a mayor profundidad. La abundancia de oxígeno y luz solar sustenta la floreciente base de la cadena trófica: se trata de las plantas unicelulares del fitoplancton que, al igual que las pluricelulares, utilizan la luz solar para sintetizar azúcares. El fitoplancton alimenta al zooplancton, formado por pequeños animales, desde diminutos crustáceos parecidos a camarones hasta larvas de peces gigantescos. El zooplancton es ingerido a su vez por pequeños

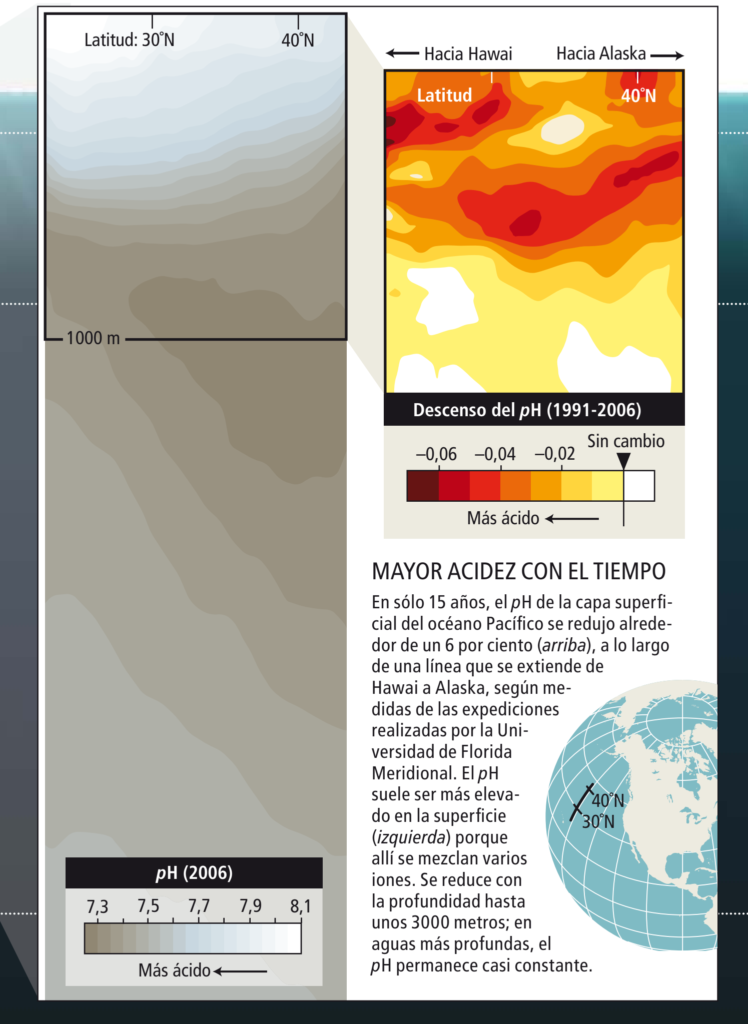
El registro geológico indica la práctica desaparición de la vida marina ante cambios de *p*H equiparables al actual

JEN CHRISTIANSEN (*panel derecho*); FUENTE: "DIRECT OBSERVATIONS OF BASIN-WIDE ACIDIFICATION OF THE NORTH PACIFIC OCEAN," DE ROBERT H. BYRNE ET AL., EN *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 37, L02601; 20 DE ENERO DE 2010

FORMACION DE ACIDO

Las moléculas de dióxido de carbono del aire son absorbidas por el agua marina superficial. El CO_2 reacciona con el agua (H_2O) para formar ácido carbónico (H_2CO_3). La mayor parte de este ácido débil se disocia en hidrogeniones (H^+) y bicarbonato (HCO_3^-). Parte de los iones bicarbonato también se disocian, con lo que se produce más H^+ y desciende el *p*H.





MAYOR ACIDEZ CON EL TIEMPO

En sólo 15 años, el *p*H de la capa superficial del océano Pacífico se redujo alrededor de un 6 por ciento (*arriba*), a lo largo de una línea que se extiende de Hawai a Alaska, según medidas de las expediciones realizadas por la Universidad de Florida Meridional. El *p*H suele ser más elevado en la superficie (*izquierda*) porque allí se mezclan varios iones. Se reduce con la profundidad hasta unos 3000 metros; en aguas más profundas, el *p*H permanece casi constante.

Los objetivos sobre emisiones de gases deben lograr que el descenso del *p*H no supere las 0,1 unidades a lo largo del presente siglo

peces, que sirven de alimento a animales de mayor tamaño, y así sucesivamente.

Los vientos ayudan a mezclar las capas superficial y más profunda, con el consiguiente transporte de oxígeno hacia abajo y de nutrientes hacia arriba. Pero el flujo de nutrientes entre la superficie y el fondo del mar lo facilita también el movimiento de los animales, vivos o muertos. Una extensa clase de crustáceos diminutos, los copépodos, migra cada noche, aprovechándose de la oscuridad, desde las capas medias y profundas hasta las superficiales, donde disfrutan del banquete que los rayos solares les han preparado durante el día. Numerosos peces y calamares siguen de cerca sus movimientos, mientras que los moradores de las aguas profundas aguardan a los restos de la copiosa comida que se van hundiendo. Cuando los animales ascienden y descienden, atraviesan aguas con diferente *p*H. Pero la acidificación modifica ese perfil de *p*H, y ello podría ocasionar daños a los organismos.

El aspecto interno

La acidificación puede obligar a los organismos a invertir más energía en la recuperación y mantenimiento del equilibrio interno de *p*H. Consumen así energía que de otro modo se dedicaría a otros procesos vitales, como el crecimiento y la reproducción.

Incluso pequeños aumentos en la concentración del CO_2 del agua pueden causar una rápida difusión de éste hacia el cuerpo de los animales de respiración acuática. Una vez en su interior, el gas reacciona con los fluidos internos y se forman hidrogeniones, lo que aumenta la acidez de los fluidos o tejidos corporales. Las especies utilizan diversos mecanismos para equilibrar su *p*H interno: producir iones negativos, como el bicarbonato, que captan o amortiguan los hidrogeniones sobrantes; bombear iones hacia el interior o el exterior de las células y espacios intercelulares; y reducir el metabolismo para absorber menos iones y "aguardar" hasta que termine el período con exceso de H^+. Pero ninguna de esas estrategias sirve para habérselas con una reducción sostenida del *p*H. Cuando un organismo se esfuerza para recuperar el equilibrio ácido-base, sacrifica energía. Algunas funciones básicas, como la síntesis de proteínas y el mantenimiento de un sistema inmunitario potente, pueden verse asimismo afectados.

La mayoría de las especies poseen moléculas tampón o amortiguadoras. Los peces y otras especies activas las acumulan para contrarrestar el descenso temporal de *p*H durante la propulsión rápida. Como le sucede a un corredor en un *sprint*, los músculos cambian hacia un metabolismo anaeróbico (no basado en el oxígeno), lo que consume más ATP (la principal molécula combustible) y, como consecuencia, se acumulan más iones H^+. Pero pocas especies pueden hacer acopio de suficientes moléculas amortiguadoras para que ejerzan su efecto a largo plazo. Si se produjeran pequeños cambios de *p*H graduales, a lo largo de decenas de miles de años, una especie podría desarrollar adaptaciones; podría conservar las mutaciones genéticas que dieran lugar a una mayor síntesis de moléculas amortiguadoras. Pero, por lo general, las especies no pueden adaptarse a los cambios que surgen en apenas unos siglos. Alteraciones similares realizadas en el laboratorio durante días o semanas tienen un efecto letal.

En épocas pasadas, cuando las concentraciones de CO_2 aumentaban, las especies con

GEORGE RETSECK (*ilustración*); "NEAR-FUTURE LEVEL OF CO_2-DRIVEN OCEAN ACIDIFICATION RADICALLY AFFECTS LARVAL SURVIVAL AND DEVELOPMENT IN THE BRITTLESTAR *OPHIOTHRIX FRAGILIS*", DE SAMUEL DUPONT ET AL., EN *MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES*, VOL. 373; 2008 (*ofiuras*); ROBERT ELLIS *Universidad de Plymouth* (*huevos*)

EL ESFUERZO POR NEUTRALIZAR

El aumento de CO_2 en el agua provoca una mayor entrada de H^+ en el cuerpo de los animales, con lo que sus tejidos se tornan más ácidos. Las especies adoptan distintas medidas para evitarlo, pero todas ellas consumen energía. Por un lado, las células bombean al exterior los iones H^+ sobrantes: la energía de una molécula de ATP empuja a los iones a través de un canal unidireccional en la membrana celular (*A*). Por otro, el cuerpo produce más moléculas amortiguadoras, como los iones bicarbonato (HCO_3^-), que se enlazan con los iones H^+ y los transportan hacia el exterior (*B*).

▶ SERES DEBILITADOS

Los experimentos de laboratorio demuestran la alteración del desarrollo y la fecundidad de los animales marinos en aguas más ácidas. Las larvas de ofiuras criadas durante ocho días en agua con un *p*H de 8,1, valor habitual de los océanos actuales, alcanzaron la madurez y eran simétricas (*arriba, izquierda*), pero las que se mantuvieron a un *p*H de 7,7 eran deformes (*abajo, izquierda*) y ninguna logró un desarrollo completo. Todos los huevos de caracol fecundados que se habían sometido a un *p*H de 8,05 presentaron embriones que al cabo de 18 días habían desarrollado conchas (*arriba, derecha*), pero en agua con un *p*H de 7,6 (*abajo, derecha*) algunos huevos estaban hueros y algunos embriones todavía no habían desarrollado la concha.

sistemas peor amortiguados sobrevivían con dificultad. El descenso del *p*H puede perjudicar sobre todo a las especies abisales, adaptadas a un ambiente estable y mal preparadas ante los cambios. (De ahí que la propuesta de bombear grandes cantidades de CO_2 en el océano profundo para combatir el cambio climático despierte inquietud, ya que desestabilizaría los hábitats de una gran variedad de animales.)

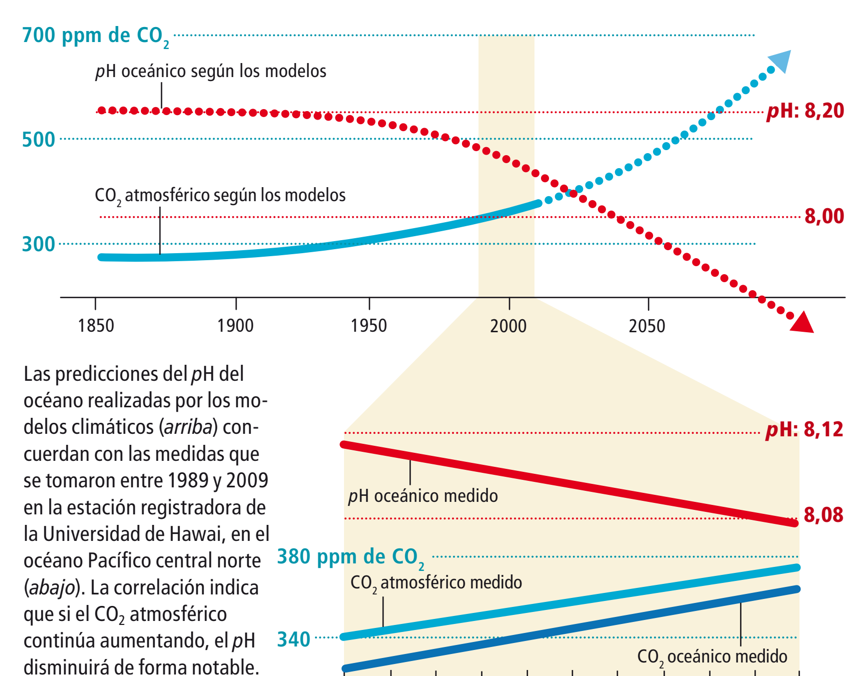
Crecimiento y reproducción deficientes

Los efectos de la acidificación del océano en los organismos varían según el estadio de desarrollo que atraviesen. Un conjunto reducido de datos, aunque cada vez más importante, apunta a una variedad de problemas en potencia.

En efecto, la fecundación, que representa el inicio de la vida, puede verse alterada. En el laboratorio, los científicos simulan la acidificación mediante el bombeo de burbujas de CO_2 en acuarios con agua de mar. Tal como Havenhand había indicado en nuestro viaje, la motilidad y la velocidad de los espermatozoides del erizo de mar australiano *Heliocidaris erythrogramma* disminuían un 16 y un 12 por ciento, respectivamente, ante un descenso de 0,4 unidades en el *p*H del agua (dentro del intervalo predicho para 2100). El éxito de la fecundación se reducía un 25 por ciento. En la naturaleza, una disminución del 25 por ciento mermaría con el tiempo la población adulta. Aunque cada erizo de mar libera millones de espermatozoides, éstos no permanecen viables durante mucho tiempo; deben encontrar un óvulo y fecundarlo en pocos minutos. En un océano vasto y turbulento, los espermatozoides poco activos quizá no alcancen nunca su destino.

JEN CHRISTIANSEN (*gráficas*); FUENTES: "DIRECT EFFECTS OF CO_2 CONCENTRATION ON GROWTH AND ISOTOPIC COMPOSITION OF MARINE PLANKTON", DE DIETER A. WOLF-GLADROW ET AL., EN *TELLUS SERIES B-CHEMICAL AND PHYSICAL METEOROLOGY*, VOL. 51, N.º 2; 2002, Y "PHYSICAL AND BIOGEOCHEMICAL MODULATION OF OCEAN ACIDIFICATION IN THE CENTRAL NORTH PACIFIC", DE JOHN E. DORE ET AL., EN *PNAS*, VOL. 106, N.º 30; 28 DE JULIO DE 2009

MODELOS Y MEDICIONES EN EL PACIFICO

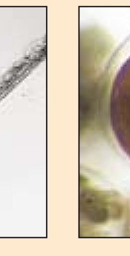


Las predicciones del *p*H del océano realizadas por los modelos climáticos (*arriba*) concuerdan con las medidas que se tomaron entre 1989 y 2009 en la estación registradora de la Universidad de Hawai, en el océano Pacífico central norte (*abajo*). La correlación indica que si el CO_2 atmosférico continúa aumentando, el *p*H disminuirá de forma notable.

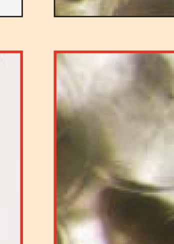
ESTRUCTURA INTERNA | FECUNDIDAD

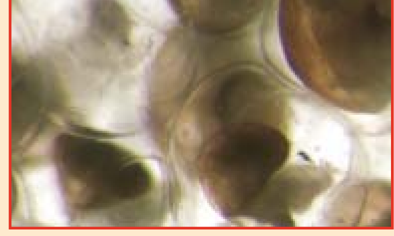
CONDICIONES NORMALES





CONDICIONES ACIDAS





La acidificación también malogra los estadios larvarios tempranos de varias especies. Samuel Dupont, que trabaja en el mismo laboratorio que Havenhand en Gotemburgo, sometió a larvas de una ofiura (pariente de las estrellas de mar) de aguas templadas a un descenso del *p*H de entre 0,2 y 0,4 unidades. Muchas demostraron un desarrollo anómalo; menos del 0,1 por ciento sobrevivieron más de ocho días. En otro estudio sobre el caracol *Littorina obtusata*, la eclosión de embriones disminuyó al exponerlos a aguas con un *p*H más ácido, y los que lo hicieron se movían con menor frecuencia y mayor lentitud de lo normal.

Un cambio súbito de 0,2 a 0,4 unidades de *p*H es más drástico que el experimentado por las especies en la naturaleza. Aunque algunas de ellas podrían adaptarse a una modificación gradual, otras no toleran siquiera los efectos de una acidificación leve. Los científicos sospechan que la acidificación del océano explicaría la mortalidad reciente de larvas de ostras a lo largo de la costa de Oregón; como consecuencia, algunos ostricultores se las ven y se las desean para encontrar suficiente semilla de ostra para mantener el negocio.

También los animales adultos sufren daños, sobre todo en lo que respecta al crecimiento. Los erizos de mar y los caracoles suelen desplazarse despacio; pero un crecimiento más lento les plantea problemas. En 2005, investigadores de la Universidad de Kyoto determinaron que un incremento de 200 ppm en la concentra-

Los autores

Marah J. Hardt, fundadora de Ocean-Ink, ejerce como investigadora, escritora y consultora en la Isla Grande de Hawai. Ecóloga experta en arrecifes coralinos y anteriormente miembro del Instituto Océano Azul en Cold Spring Harbor, Nueva York, trabaja para resolver diversas cuestiones, desde la sobrepesca mundial hasta la conservación de las aguas continentales. **Carl Safina** es presidente fundador del Instituto Océano Azul y profesor de la Universidad de Stony Brook.

ción de CO_2 respecto al valor actual, obtenido mediante el bombeo del gas en el agua durante seis meses, reducía las tasas de crecimiento de los erizos de mar *Hemicentrotus pulcherrimus* y *Echinometra mathaei*, y de la bocina fresa, *Strombus luhuanu*. El aumento de 200 ppm es el predicho para los próximos cuatro a cinco decenios. El crecimiento más lento lleva a un menor tamaño de los individuos durante más tiempo, con lo que se vuelven más vulnerables ante los depredadores y pierden capacidad reproductora.

La acidificación también dificulta en algunas especies de fitoplancton la absorción de hierro, un micronutriente básico para el crecimiento. Investigadores de la Universidad de Princeton indican que una reducción de 0,3 unidades de *p*H haría disminuir entre el 10 y el 20 por ciento la absorción de hierro por parte del fitoplancton. Además de representar un eslabón muy importante de la cadena trófica, el fitoplancton produce enormes cantidades de oxígeno, que nosotros respiramos.

En otros experimentos, la ofiura *Amphiura filiformis*, que vive sobre el sedimento, demostró un crecimiento más rápido de los brazos con un *p*H inferior, pero perdió masa muscular. Los músculos fuertes resultan necesarios para alimentarse, construir madrigueras y escapar de los depredadores. Una reducción del *p*H de entre 0,3 y 0,5 unidades suprimió la respuesta inmunitaria en el mejillón común al cabo de un mes. La reducción del vigor, el crecimiento, la función inmunitaria o la reproducción puede mermar las poblaciones a largo plazo; ese efecto no sólo perjudica a las propias víctimas, sino también a otras muchas especies (incluida la nuestra) que se basan en ellas para la alimentación e incluso el hábitat. Así, mediante el ramoneo, los erizos de mar ayudan a mantener saludables los arrecifes de coral y los bosques de laminarias; y la mezcla de sedimentos realizada por las ofiuras resulta fundamental para la vida en ellos de numerosas especies.

La acidificación del océano puede provocar la desaparición de algunos animales. Tras exponer una muestra de *Paraeucheta elongata*, una especie de copépodo común en aguas de la costa de California, a un descenso del *p*H del agua de 0,2 unidades respecto al valor normal, la mitad de los organismos murieron en una semana. Los peces que incluimos en nuestra dieta, como atunes, salmones y meros, dependen de la abundancia de determinados copépodos, ya que representan el sustento de las presas de esos peces.

Varias especies de peces, como el perro pintado (*Anarhichas minor*), han demostrado una notable tolerancia a la acidez en el laboratorio. Presentan una reserva notable de sustancias amortiguadoras y almacenan más oxígeno de lo normal en sus tejidos, lo que constituye una ventaja, porque los iones H^+ interfieren en la absorción del oxígeno del agua por la sangre. Pero incluso los peces muy adaptables pueden verse en apuros si se reduce su fuente de alimentación. Y hay especies no tan bien adaptadas, como los activos calamares, que no poseen una reserva de oxígeno y consumen siempre todo el que disponen. Una menor concentración de oxígeno en la sangre limitaría su capacidad de cazar, escapar de los depredadores y aparearse. Una caída del *p*H de sólo 0,15 unidades dañaría a la pota (*Illex illecebrosus*), un calamar de importancia comercial.

De los estudios de laboratorio, así como del registro geológico, se deduce que la acidificación del océano obliga a los animales a realizar grandes esfuerzos, que se añaden a los que ya deben hacer para luchar contra otros factores de estrés inducidos por nuestra especie, como el calentamiento de las aguas, la contaminación y la sobrepesca.

¿Adaptación a la acidez?

Los experimentos de laboratorio duran desde algunas semanas hasta varios meses. El cambio climático tiene lugar a lo largo de decenios y siglos, y algunas especies podrán adaptarse al mismo, sobre todo las de ciclo reproductivo corto. Cada vez que un animal se reproduce, pueden surgir en sus descendientes mutaciones genéticas que ayuden a la siguiente generación a ajustarse a las nuevas circunstancias. Sin embargo, el intervalo de noventa años (el tiempo en que se ha predicho un descenso de 0,3 a 0,5 unidades de *p*H) es muy corto para la adaptación genética de especies con un ritmo lento de reproducción, especies que quizá ya sufren la reducción del *p*H del 30 por ciento. Las extinciones suelen producirse por la pérdida de individuos a lo largo de siglos; una reducción de sólo un 1 por ciento de los individuos por generación causaría la extinción de una especie en menos de un siglo.

Resulta alarmante que el descenso del *p*H observado hasta ahora y el previsto en el futuro de seguir las tendencias de emisión actuales sean 100 veces más rápidos que cualquier cambio sucedido en milenios anteriores. Si no se actúa para evitarlo, los niveles de CO_2 crearán un océano muy diferente, un océano nuevo para las especies actuales.

La interacción de los efectos de la acidificación y de otros problemas a los que se enfrentan los animales hace aún más improbable la adaptación. Así, un aumento de la concentración de CO_2 puede acortar el intervalo de temperaturas en el que sobrevive una especie. Estas limitaciones se observan



DATOS FUTUROS

En diciembre de 2009, el Instituto Scripps de Oceanografía instaló boyas equipadas con sensores de dióxido de carbono y de *p*H en el océano Pacífico, que proporcionan datos a los proyectos de investigación sobre el ecosistema de la corriente de California. Esa información mejorará las predicciones sobre la acidificación del océano.

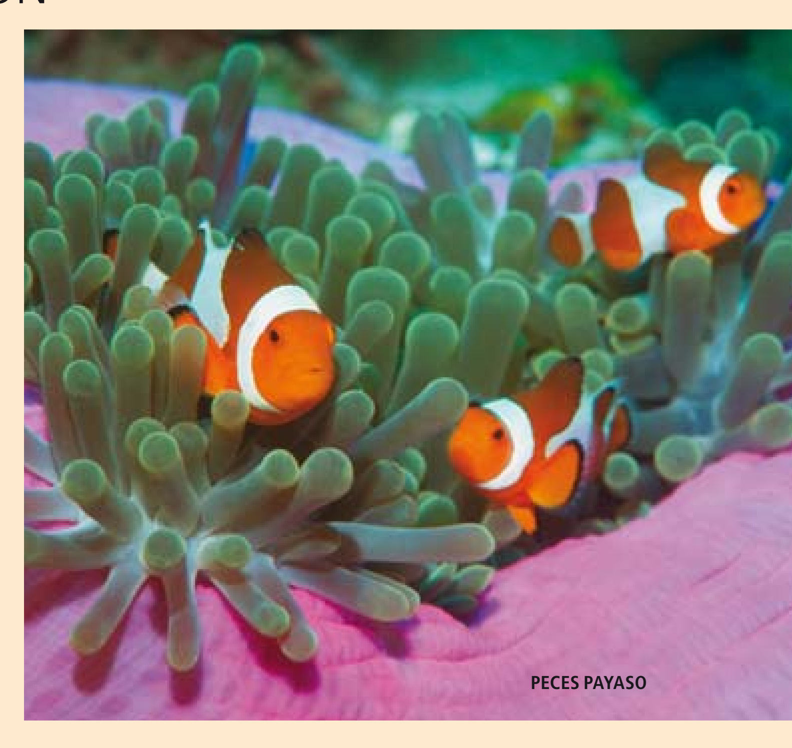
CORTESIA DE UWE SEND'S LAB, HTTP://MOORING.UCSD.EDU

ALTERACION DE LA PERCEPCION

Amén de interferir con las características químicas internas de numerosas especies, la acidificación estaría afectando a la supervivencia de otras maneras insólitas.

Muchas especies marinas se basan en estímulos olfativos sutiles para encontrar presas, pareja o un hábitat adecuado. Determinados peces payaso distinguen entre olores atractivos y repulsivos para decidir en qué arrecife y en qué anémona instalarse para el resto de sus días. En estudios de laboratorio, se ha comprobado que las larvas de peces payaso criadas en agua de mar con un *p*H de 0,2 a 0,4 unidades inferior al de la media oceánica actual nadan hacia estímulos negativos y no responden a los positivos. Sus órganos nasales parecen normales, pero se cree que la acidificación puede alterar la propagación de las señales químicas a través del sistema neurológico. Hacen falta más estudios para determinar si este trastorno afecta a comunidades de peces de distintas partes del mundo.

Las interacciones complejas y reguladas por el *p*H que existen entre moléculas también aumentan o reducen la recepción del sonido. La acidificación del océano lo amplifica; si el *p*H disminuye otras 0,3 unidades (valor acorde con las predicciones hacia 2100), los océanos se tornarían un 40 por ciento más ruidosos. Aunque no hay estudios sobre la relación directa entre el aumento de ruido causado por la acidificación y la supervivencia de los animales, esos hallazgos despiertan alarma, porque los organismos marinos, en especial los mamíferos, dependen del sonido para la orientación, la comunicación, la caza y el cortejo.



PECES PAYASO

GEORGETTE DOUWMA *Nature Picture Library*

ya en los corales y algunas algas, que padecen estrés térmico a temperaturas inferiores a las normales cuando se exponen a una mayor concentración de CO_2.

Opciones para el futuro

Una y otra vez, los científicos han subestimado los efectos del cambio climático, desde la fusión del hielo del Artico hasta la subida del nivel del mar. Cada vez más, los expertos recomiendan limitar las emisiones de CO_2 a la atmósfera para mitigar el calentamiento global. Pero los objetivos de emisión también debieran establecerse teniendo en cuenta la acidificación del océano. Una acidificación galopante reestructuraría por completo los ecosistemas marinos, con efectos en cascada que se extenderían por toda la cadena trófica. Puede que algunas especies logren medrar con una nueva combinación de especies de plancton, mientras otras no lo resistan. Pero se desconoce si las especies de las que más dependemos (o que más apreciamos) sobrevivirán. Los cambios pueden asimismo afectar al turismo y eliminar recursos farmacéuticos y biomédicos en potencia.

La acidificación del mar también altera el ciclo del carbono en el planeta. Aunque en la actualidad los océanos absorben una enorme cantidad de emisiones humanas, la tasa de absorción va menguando a medida que la concentración de CO_2 en el agua aumenta y el gas se acumula en la superficie del mar. Como resultado, la concentración de CO_2 atmosférico ascenderá aún más deprisa y se acelerarán los cambios meteorológicos mundiales.

Tales consecuencias exigen fijar unos límites a las emisiones para que la caída del *p*H no supere 0,1 unidades a lo largo del presente siglo. Cada vez más, el objetivo de reducir el nivel de CO_2 atmosférico hasta 350 ppm parece el más racional. Estabilizarlo a 450 ppm hacia 2100, como algunos han sugerido, supondría un descenso de otras 0,1 unidades de *p*H. Ello significaría la condena para los arrecifes de coral, y algunos animales dejarían de fabricar conchas, especialmente en el océano Austral, que rodea la Antártida. Debido a su baja temperatura y peculiar patrón de circulación, en ese océano se empezarán a disolver conchas y estructuras esqueléticas antes que en otros océanos. Resulta mucho más fácil frenar la acidificación que invertir los cambios ya sucedidos; los sistemas amortiguadores naturales necesitarían de cientos a miles de años para restablecer el *p*H a sus niveles preindustriales.

¿Cuál es la solución? Para empezar, la administración Obama debiera promulgar una política oceánica nacional (la primera que tendría Estados Unidos), con el fin de coordinar las acciones en contra de las múltiples amenazas. La Agencia de Protección Ambien-

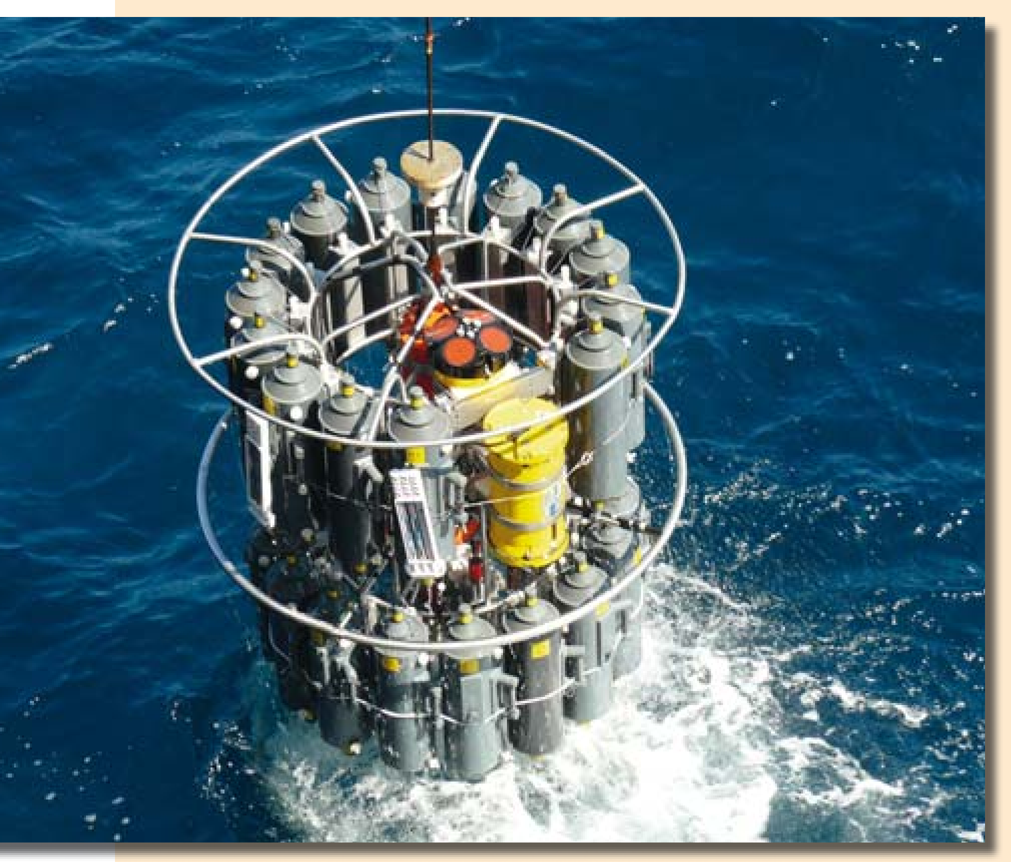
Una acidificación galopante reestructuraría por completo los ecosistemas marinos, con efectos en toda la cadena trófica

EL OCEANO ATLANTICO, SUMIDERO DE CO_2

Mientras el hombre se afana por hallar soluciones de geoingeniería que permitan inyectar y almacenar en el océano el exceso de CO_2 derivado de la quema de combustibles fósiles, los cambios en el uso del suelo y la deforestación, el propio océano cuenta con mecanismos naturales de disolución, captación y almacenamiento del gas. Una reciente evaluación de las principales fuentes y sumideros de CO_2 a escala global ha estimado que los océanos almacenan un total de 2,3 petagramos (Pg, 10^{15} g) de carbono (C) al año, lo cual supondría el 28 por ciento de C antropogénico emitido a la atmósfera anualmente.

El océano Atlántico, a pesar de su modesta área (29 por ciento del océano global), contribuye en un 38 por ciento al almacenamiento mundial. Ello se debe a la intensidad de la circulación y a los numerosos procesos de formación de masas de agua (enfriamiento y hundimiento del agua de superficie), principalmente en el Atlántico Norte, que inyectan hacia las profundidades el C antropogénico disuelto en las capas superficiales en contacto directo con la atmósfera. Así, desde el inicio de la revolución industrial hasta finales del siglo XX, el Atlántico ha almacenado 55.000 millones de toneladas de C de origen antrópico.

La acumulación se ha producido a diferentes ritmos, fuertemente gobernados por dos procesos. El primero es la variabilidad de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), el fenómeno climático que controla la intensidad y dirección de los vientos del oeste y las trayectorias de tormenta, y, por tanto, el transporte de calor y humedad. El segundo proceso corresponde a la circulación termohalina, que se produce por los gradientes de densidad creados por las diferencias de temperatura y salinidad entre las regiones ecuatoriales y polares. La circulación termohalina transporta y redistribuye calor y materia, y es especialmente intensa en el Atlántico Norte.



LA ROSETA es un equipo imprescindible en toda campaña oceanográfica. Permite caracterizar las propiedades fisicoquímicas de la columna de agua a lo largo de un transecto oceánico. Está equipada con hasta 30 botellas de muestreo, una sonda que mide la conductividad, la temperatura y la profundidad, y un medidor acústico de las velocidades de corriente. Las botellas contienen muestras de agua de mar tomadas a distintas profundidades. Una vez a bordo, se extraen de esas botellas pequeñas cantidades de agua para analizar la cantidad de oxígeno disuelto, concentraciones de nutrientes, alcalinidad, carbono inorgánico disuelto, *p*H y otros parámetros.

MARCOS VAZQUEZ RODRIGUEZ

Evolución reciente

La variabilidad temporal de las tasas de almacenamiento de C antropogénico en el Giro Subpolar Noratlántico (NASPG, entre los 45º y 65º de latitud norte) está fuertemente dominada por las fases de la NAO. Esta zona representa el motor principal del transporte oceánico y tiene una importancia vital en el clima mundial. Las fases de la NAO establecen una relación entre la posición e intensidades relativas del anticiclón de las Azores y las bajas presiones de Islandia. La fase alta se corresponde con períodos de intensa formación de masas de agua en el NASPG e importantes cambios en los censos volumétricos de las mismas, como el Agua de Labrador. Ello influye notablemente en la cantidad de C antropogénico almacenado y transportado desde las capas superficiales del océano ("cargadas" de CO_2 de la atmósfera) hasta las regiones intermedias y profundas. En el NASPG, durante la fase alta de la NAO, desde 1991 hasta 1997, las tasas de almacenamiento de C antropogénico fueron un 48 por ciento superiores (0,054 Pg C al año) a las calculadas durante la fase baja de la NAO que le sucedió, desde 1997 hasta 2006 (0,026 Pg C al año). Este resultado apunta hacia un debilitamiento del Atlántico Norte como sumidero natural de CO_2.

A partir de medidas *in situ* de *p*H se han observado tasas de acidificación en las aguas superficiales del NASPG, en contacto permanente con la atmósfera, de hasta –1,8 milésimas de unidades de *p*H por año. De forma inquietante, el Agua de Labrador, que ocupa una posición intermedia en la columna de agua, muestra unas tasas de acidificación insólitas y sin precedentes: una disminución media de 15 milésimas de unidades de *p*H por decenio. De seguir así, hacia 2050, cuando las concentraciones atmosféricas de CO_2 hayan doblado a las actuales y se sitúen en torno a los 750 ppm, podría esperarse en el Agua de Labrador una disminución de *p*H de 0,45 unidades con respecto a la época preindustrial.

Es muy probable que las repercusiones de la acidificación oceánica sobre los ecosistemas marinos traigan consigo secuelas económicas en un futuro próximo, y que las consecuencias sean de carácter irreversible incluso antes de que algunos de los hábitats afectados hayan podido ser estudiados de forma exhaustiva.

Marcos Vázquez Rodríguez
Instituto de Investigaciones Marinas
CSIC (Vigo)

tal de EE.UU. debería dar un paso más y considerar el CO_2 como contaminante en la Ley de Agua Limpia; se concedería así a los estados la autoridad para hacer cumplir los límites de emisión de CO_2. Establecer áreas marinas protegidas permitiría que las especies se recuperaran de la sobreexplotación; un mayor número de individuos daría a sus poblaciones y acervos génicos más resiliencia ante los cambios climáticos. Ajustar los límites de capturas pesqueras siguiendo las recomendaciones de los científicos y no los deseos de los políticos también ayudaría. Y firmar el Tratado de las Naciones Unidas sobre la Ley del Mar, pospuesta desde hace décadas por Estados Unidos, haría liderar la nación en la gestión responsable del mar.

Se necesitan también más estudios científicos. La financiación para respaldar iniciativas como el Proyecto europeo sobre la acidificación del océano y poner en práctica la Ley Estadounidense de Investigación y Seguimiento de la Acidificación del Océano aumentaría la comprensión de los efectos de la acidificación. Pero también se debe instaurar una red de seguimiento mucho más densa para detectar la acidificación. Un equipo internacional, que dirigen Richard Feeley, del Laboratorio Ambiental Marino del Pacífico, de Seattle, y Victoria J. Fabry, de la Universidad estatal de California en San Marcos, ha creado un plan para integrar el control de la acidificación en los programas de seguimiento oceánico existentes, como OceanSITES; sus recomendaciones debieran adoptarse lo antes posible. Si además se dedican esfuerzos para combinar los datos de campo con los experimentos de laboratorio, como en el Proyecto interdisciplinar de boyas instrumentadas para medir parámetros biogeoquímicos en el ecosistema de la corriente de California, se asegurará que los experimentos simulen condiciones reales.

En última instancia, la solución a la acidificación del océano debe apoyarse sobre una nueva economía energética. En vista de las recientes explosiones letales de minas de carbón y de plataformas de perforación marinas, así como del catastrófico vertido de petróleo del golfo de México, a Estados Unidos le sobra motivos para elaborar una estrategia energética más segura para el planeta. Sólo una reducción drástica del consumo de combustibles fósiles impediría que ulteriores emisiones de CO_2 contaminaran los mares. Un plan explícito para pasar de fuentes de energía finitas y peligrosas a fuentes de energía renovables y limpias ofrece a las naciones una ruta más segura de progreso. Y brinda al planeta, en especial a los océanos, la oportunidad de un futuro saludable.

Bibliografía complementaria

LA ACIDIFICACION DE LOS OCEANOS. Scott C. Doney en *Investigación y Ciencia*, n.º 356, págs. 50-57; mayo de 2006.

IMPACTS OF OCEAN ACIDIFICATION ON MARINE FAUNA AND ECOSYSTEM PROCESSES. Victoria J. Fabry *et al*. en *ICES Journal of Marine Science*, vol. 65, n.º 3, págs. 414-432; abril de 2008.

Proyecto europeo sobre la acidificación del océano: **www.epoca-project.eu**

Para más consideraciones sobre investigación y política, véase la página **www.oceanacidification.net**

Programa estadounidense sobre carbono oceánico y biogeoquímica: **www.whoi.edu/OCB-OA**

LA VERDADERA CORONA SOLAR

Durante años, ciertos efectos visuales y una mala interpretación de las imágenes de la corona solar han confundido a los astrónomos sobre el origen y las propiedades del viento solar

RICHARD WOO

La luz blanca de la corona solar, un halo luminoso que aparece durante los eclipses, ha cautivado siempre al ser humano. A pesar de la larga historia de observaciones y registros de este curioso fenómeno, no fue hasta 1860 cuando se identificó la corona con la atmósfera del Sol. Ello marcó el inicio del estudio científico de la atmósfera solar. A día de hoy resulta curioso pensar que serían necesarios 150 años de investigación para completar la comprensión del fenómeno. Pero más extraña es aún la historia sobre el modo en que nuestra percepción psicológica de un objeto puede influir de manera inconsciente en su estudio científico.

Una visión eclipsada

No deja de ser irónico que un eclipse total revele tantos detalles importantes sobre la estructura solar. Durante un eclipse se hacen visibles los rasgos más tenues que rodean la estrella: la corona solar. Los estudios de la corona de luz blanca que aparece durante los eclipses pueden agruparse en tres períodos. En el primero, durante la segunda mitad del siglo XIX, las observaciones a simple vista se vieron acompañadas por fotografías sólo en ocasiones puntuales. Sobre las primeras existen informes detallados, así como dibujos y grabados cuya fidelidad dependía de la destreza de los astrónomos y artistas, y de los encargados de reproducir esas ilustraciones. En su libro *La corona solar*, de 1996, Donald Billings escribe:

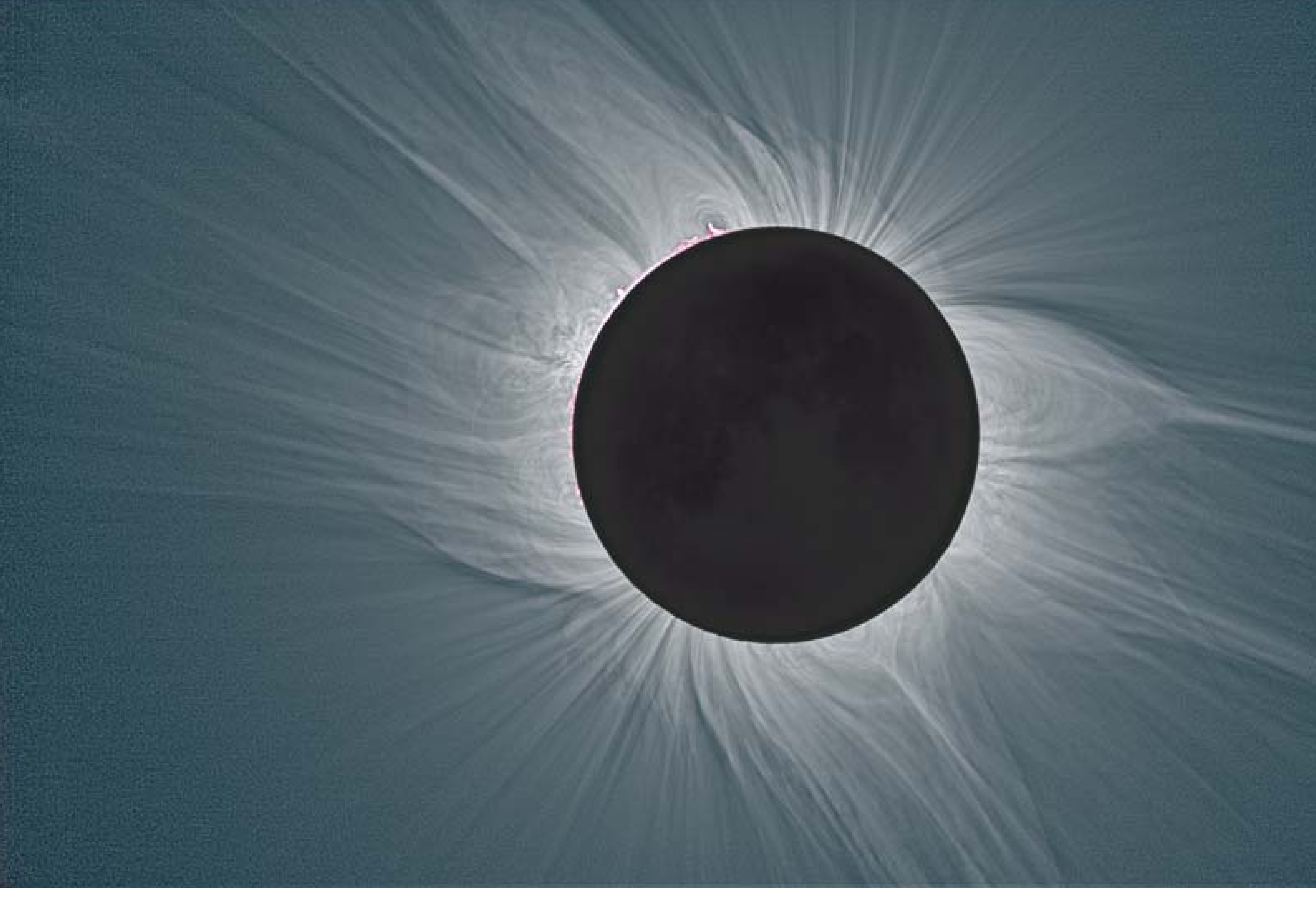
> "[...] los últimos 60 años del siglo XIX marcaron el verdadero comienzo del estudio científico de la corona. Se reconoció que la misma constituye un objeto digno de estudio y a él se aplicaron todas las técnicas conocidas para el análisis de la luz (fotografía, fotometría, espectroscopía y polarimetría). No obstante, la técnica que en este período alcanzó la perfección fue la observación visual. Esta se realizó con tanto entusiasmo y fue referida con tanta elocuencia que, a día de hoy, aquellos de nosotros que dependemos de la fotografía para su estudio hemos de volver a los escritos del siglo XIX si queremos encontrar palabras que describan la corona."

Una de esas descripciones fue realizada por el estudioso del Sol Charles Young en su libro *El Sol*, de 1896:

> "Un eclipse total de Sol es, sin duda, uno de los fenómenos naturales más impresionantes que existen. La corona o aureola de luz que rodea al Sol es su característica más espectacular. En tales ocasiones, y si el cielo está despejado, la Luna se muestra de color negro azabache, con apenas la iluminación justa en su borde para hacer patente de un modo impresionante su esfericidad. La Luna no aparece plana, sino como lo que realmente es: una gigantesca bola oscura.

CONCEPTOS BASICOS

- El procesado de las imágenes de la corona solar que se ha venido utilizando durante años reproduce bien la impresión que capta el ojo desnudo. Sin embargo, ésta última es una "ilusión óptica", un artificio de nuestra percepción visual.
- Las conclusiones sobre el campo magnético solar extraídas a partir de las imágenes procesadas han dado lugar a modelos erróneos sobre los orígenes y evolución del viento solar.
- Mediciones recientes de la densidad de plasma en la corona solar sugieren una dinámica diferente del magnetismo y del viento solar.



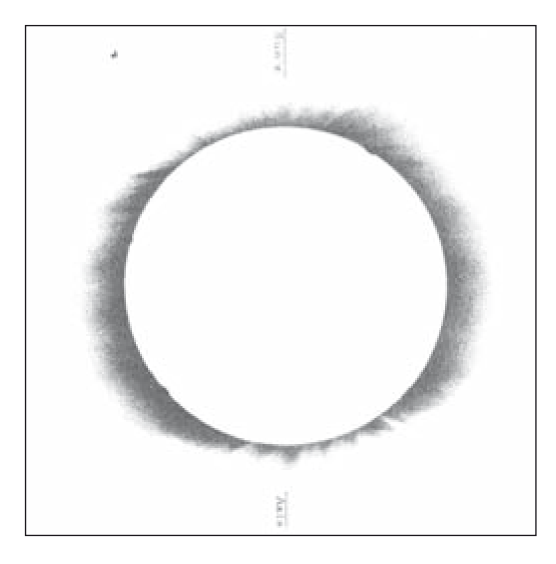
CORTESIA DE MASSIMILIANO LATANZZI Y SOCIEDAD AMERICANA DE ASTRONOMIA (AAS)/*American Scientist*

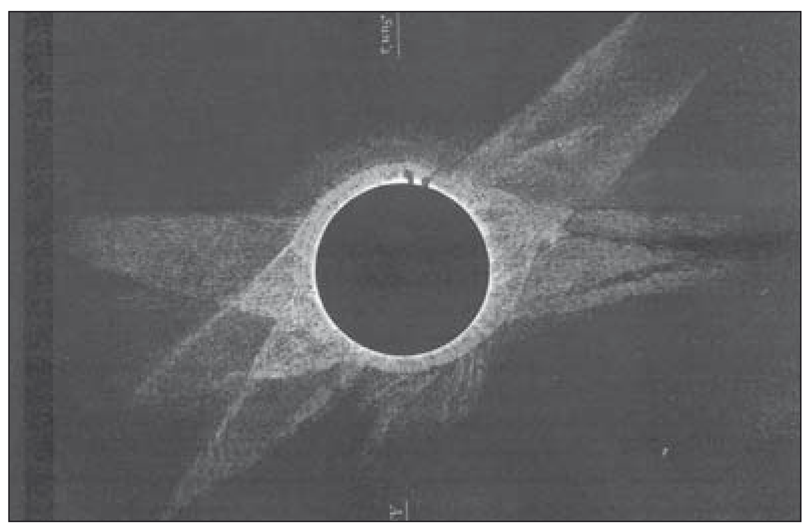
1. DURANTE UN ECLIPSE TOTAL, la corona solar, compuesta en su mayor parte de gas ionizado, se torna visible para el ojo desnudo. En imágenes como ésta, su estructura guarda semejanza con la de un campo magnético dipolar. Esta idea ha condicionado las teorías científicas sobre el origen del viento solar. Desafortunadamente, tales imágenes no son más que una falsa impresión generada por nuestro sistema visual e imitada aquí por el método de procesado de las imágenes.

Desde detrás y en todas direcciones surgen filamentos radiantes, haces y pliegos de luz blanca que, en ocasiones, alcanzan distancias de varios grados desde la superficie solar y dan forma a un irregular halo estelar en cuyo centro se halla el oscuro globo lunar. La región más próxima al Sol exhibe un brillo deslumbrante, pero de menor intensidad que algunas de las prominencias. La corona interior presenta una altura bastante uniforme, como un anillo de tres o cuatro minutos de arco de grosor, y se halla separada por un contorno definido de la corona exterior, de forma más irregular y que se extiende hasta distancias mucho mayores. Suelen apreciarse 'fisuras', como han sido denominadas: franjas de oscuridad que nacen en el mismo borde del Sol y que se pierden en la noche, muchas de las cuales recuerdan a las sombras de las nubes que aparecen sobre el Sol antes de una tormenta. En ocasiones se ven serpentinas estrechas y brillantes, tan largas o más que las fisuras. Aparecen con frecuencia inclinadas o incluso tangentes a la superficie solar, y suelen curvarse. En su conjunto, la corona es menos extensa y brillante sobre los polos solares, y existe una tendencia reconocible a la acumulación sobre las latitudes medias y sobre las regiones de manchas. De modo aproximado, puede decirse que la corona muestra una disposición en forma de un cuadrilátero o de estrella de cuatro puntas, si bien casi siempre dicha forma se ve alterada por la aparición de serpentinas anómalas en uno u otro punto."

Ya por aquel entonces existían discrepancias entre las imágenes y los informes de los observadores. El eclipse del 29 de julio de 1878 fue observado por Arthur C. Ranyard, jurista y matemático británico con estudios en astronomía. Ranyard tomó una fotografía del eclipse al tiempo que Charles Denison, médico de Denver, realizó un dibujo que más tarde se convertiría en un grabado en madera (*véase la figura 2*). Ranyard notó las diferencias entre su fotografía y el dibujo que posteriormente recibió de Denison. En su carta, Denison comentaba:

> "Tengo el placer de enviarle mi dibujo del eclipse. Su aspecto se ha visto avalado por otros testigos y el dibujo ha sido considerado como una buena representación de las tangentes y los





2. REPRESENTACIONES de la corona solar. Una fotografía (*izquierda*) y un grabado en madera a partir de la observación a simple vista (*derecha*) del mismo eclipse (29 de julio de 1878).

triángulos resultantes de la luz emitida por el Sol. Las manchas [...] se indican tal y como las observó el profesor Burnham. Logré una buena impresión de las cinco serpentinas de luz con la ayuda de unas lentes de ópera bien ajustadas. Creo haber representado la estructura de la corona.”

Ranyard, por su parte, anotó en su informe:

“Al observar la corona con el telescopio no detecté los agrupamientos convergentes de la estructura coronal mostrada en el dibujo de Denison; tales agrupamientos tampoco aparecen en mis fotografías. Pero es muy posible que los mismos hayan podido apreciarse en las regiones exteriores de la corona aunque no quedasen registrados en las fotografías ni fueran visibles con mi instrumento. La existencia de dichos agrupamientos en las regiones externas se muestra probable por el hecho de que varios observadores describieron la corona en su zona ecuatorial occidental como similar a la cola de un pez, al tiempo que otros la equipararon a una veleta bífida.”

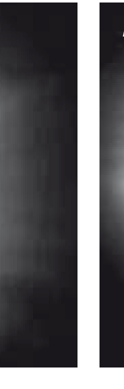
La fotografía toma el relevo

Más allá de esas elocuentes descripciones, los espectaculares avances de la astronomía a principios del siglo xx provocaron un cambio en el papel del observador. Se abandonaron las observaciones a simple vista y los bocetos hechos a mano. En su lugar, durante el segundo período de estudios de eclipses, que cubre la primera mitad del siglo xx, los astrónomos se decantaron por la fotografía. Decidieron investigar la atmósfera solar mediante estudios cuantitativos y fotométricos de las imágenes coronales.

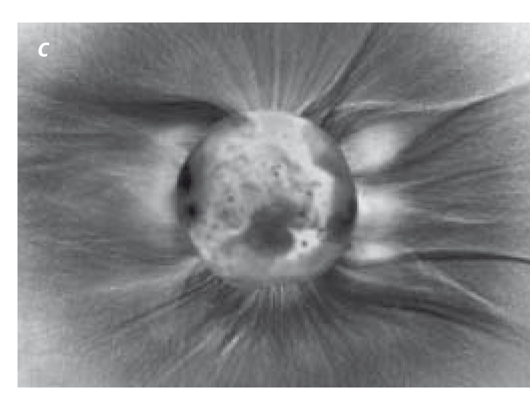
Las fotografías típicas de la corona presentan una estructura globular (*véanse las figuras 3 y 5*). La corona de luz blanca se forma cuando la luz solar de la superficie del Sol, la fotosfera, es dispersada hacia nosotros por los electrones de la corona. El brillo depende de la densidad de electrones: cuanto mayor sea su densidad, más brillante será la corona. El brillo y la densidad disminuyen muy deprisa en el exterior del Sol: más de un factor de 100 a una distancia de un radio solar desde la superficie del Sol. Semejantes variaciones convierten la obtención de mediciones e imágenes relativas a la corona en todo un reto.

En su libro *Más allá de la visión*, el historiador de la ciencia Jon Darius nos recuerda: “La interpretación es la clave. Las fotografías,

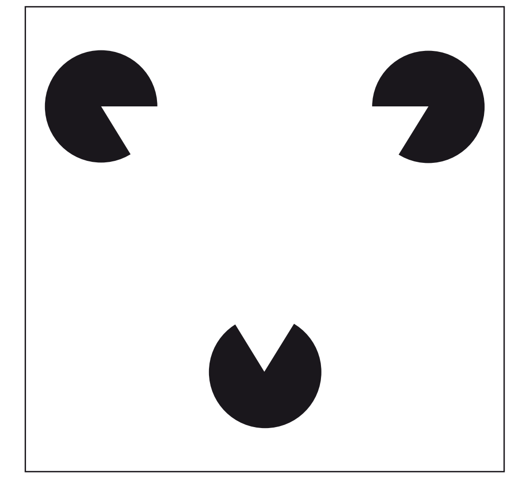
DE A. C. RANYARD, *Memoirs of the Royal Astronomical Society*, 1881 (*arriba*); CORTESIA DE SPRINGER SCIENCE Y BUSINESS MEDIA (*abajo*)/*American Scientist*







3. IMAGENES DE LA LUZ BLANCA del eclipse solar del 30 de junio de 1973. Muestran rasgos distintos según la manera en que se han obtenido. La imagen tomada sin filtro de gradiente de densidad radial (*a*) es más globular que la obtenida con dicho filtro (*b*). Cuando la imagen con filtro se procesa para resaltar los gradientes de densidad (*c*), la apariencia de la corona cambia de nuevo.







4. NUMEROSOS ROMPECABEZAS VISUALES han demostrado ser artificios del sistema visual humano. En la ilustración de la izquierda no existen líneas que conecten los círculos, pero el cerebro genera la impresión de la existencia de un triángulo. Las dos imágenes de la derecha presentan lo que se ha dado en llamar el "efecto Thatcher": el rostro modificado aparece mucho más natural cuando se encuentra invertido.

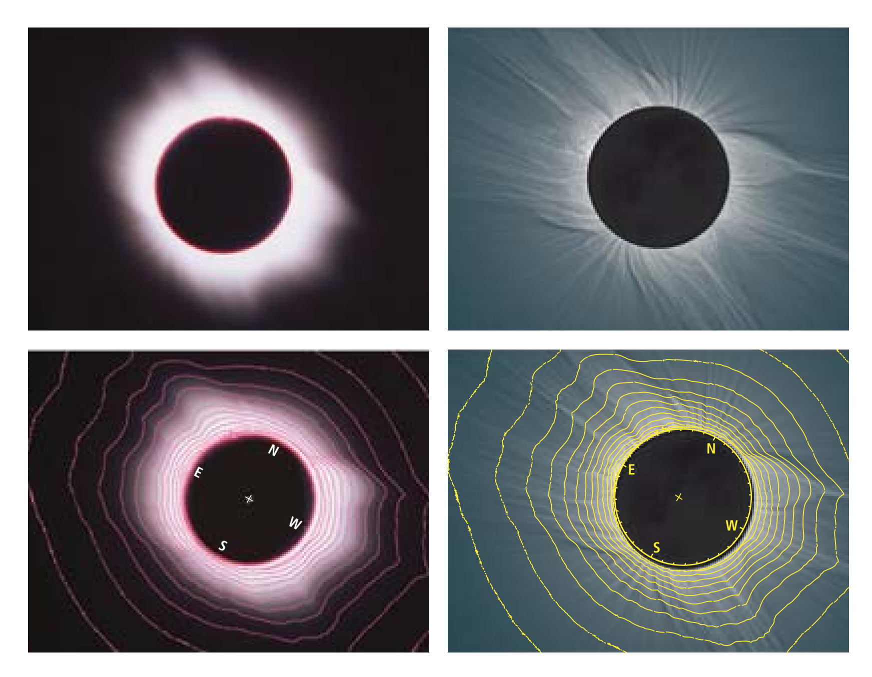
y más aún las científicas, no son más fieles a la verdad que la lectura de un galvanómetro". Las imágenes y las medidas cuantitativas son sin duda representaciones diferentes de los mismos datos. La relación entre ellas resulta esencial para descifrar las imágenes.

Al fotografiar los fenómenos solares es importante conocer la fase en la que se encuentra el Sol. En lo referente al número de manchas (regiones de intensa actividad) y su localización, la estrella presenta variaciones cíclicas con períodos de unos 11 años. El responsable de estos ciclos parece ser el campo magnético del Sol. Generados en el interior del astro, los campos magnéticos provocan gran variedad de efectos dinámicos que, en conjunto, conforman el ciclo de actividad solar. El ciclo de manchas solares no es sino su manifestación más fácil de observar.

Las medidas del brillo, o perfiles, se toman en "anillos" a lo largo de todo un intervalo de distancias desde el interior hacia el exterior. Cuando el ciclo solar se halla en un mínimo de actividad, los perfiles indican que la densidad decae con mayor prontitud en las regiones polares que en la ecuatorial. Ello explica que la forma de la corona fotografiada durante un mínimo solar se extienda más en la dirección ecuatorial. Durante un máximo solar disminuyen las diferencias entre ambas regiones, por lo que la corona presenta un aspecto más esférico. Por tanto, la variación de la forma de la corona supone otra manifestación más del ciclo de 11 años de actividad solar.

Durante la segunda mitad del siglo XX, y con el objetivo de escrutar las regiones de la corona más débiles y más alejadas del Sol, se emplearon filtros cuya densidad mostraba una gradación radial. Con ellos se quería compensar la marcada pendiente de brillo. Las imágenes resultantes mostraban una estructura dentada y muy irregular. Para apreciar mejor las variaciones a pequeña escala, se digitalizaban las imágenes para resaltar los gradientes.

Un procedimiento alternativo pero que producía un efecto similar consistía en combinar en una única imagen múltiples tomas realizadas con diferentes exposiciones. Estas imágenes fueron la base del método empleado desde el decenio de los sesenta, el tercer período en el estudio de los eclipses. Las imágenes así procesadas revelaban numerosos detalles de la corona que, si bien se apreciaban claramente con



5. LA IMAGEN DE LA LUZ BLANCA del eclipse solar del 29 de marzo de 2006 (*arriba, izquierda*) difiere de la composición procesada numéricamente de varias imágenes con diferentes exposiciones (*arriba, derecha*). Las isofotas, o curvas de brillo constante, se encuentran espaciadas logarítmicamente. Cuando se superponen las isofotas sobre las imágenes del eclipse (*abajo*) se hace patenete la verdadera forma de la corona solar. (Los físicos solares invierten el Este y el Oeste para indicar la dirección del movimiento del Sol en el cielo tal y como se ve desde la Tierra.)

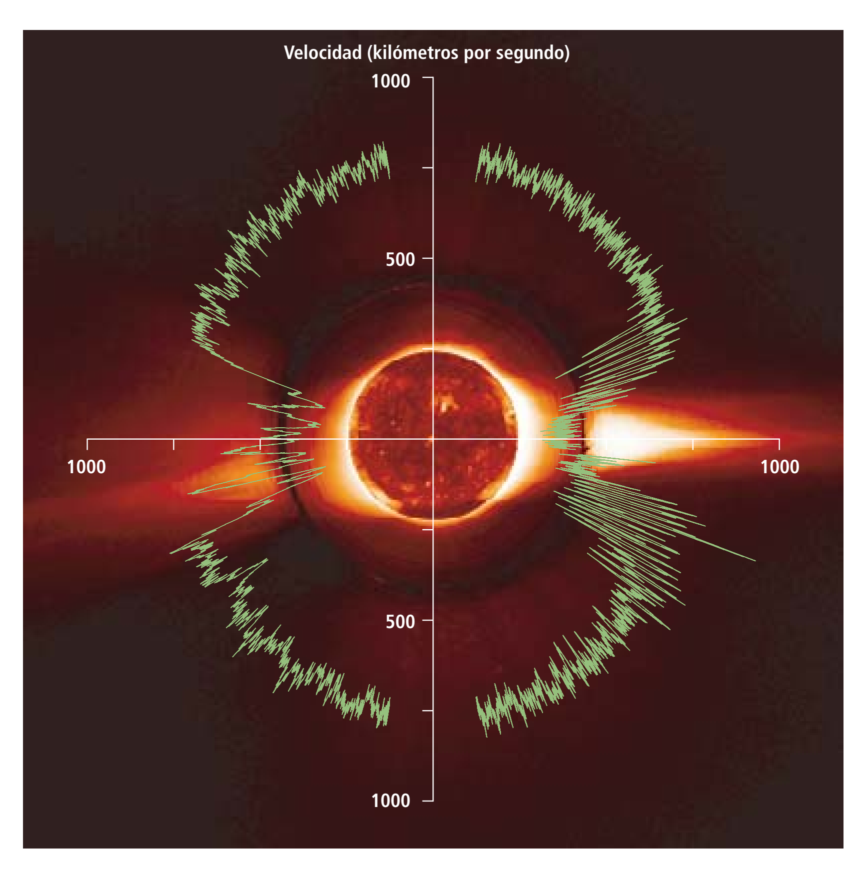
P. THOMPSON, *Perception*, 1980 (*M. Thatcher*); CORTESIA DE AAS/"SOLAR ECLIPSE IMAGES AND THE SOLAR WIND", POR R. WOO Y H. DRUCKMULLEROVA, *Astrophysical Journal*, 678; 2008/*American Scientist*

el ojo desnudo, no aparecían en las imágenes sin procesar. Esta característica hizo pensar que las imágenes tratadas proporcionaban muestras más completas y correctas de la corona solar. Pero, como veremos, la manera en que nuestros ojos aprecian la corona solar no tiene por qué ser la más fiel al fenómeno.

Inteligencia visual

Si una persona ciega desde los 3 años recupera la vista en la edad adulta, será incapaz de reconocer fisonomías: todos los rostros le parecerán iguales. Aunque el reconocimiento de rostros y la investigación de la corona solar no posean una relación directa, comparten un mismo mecanismo que produce resultados sorprendentes: la compleja y sutil cooperación entre el ojo y el cerebro para producir imágenes.

Tal y como el psicólogo experimental Richard Gregory comenta en su obra *Ojo y cerebro*, la visión nos resulta tan familiar que cuesta entender que, en realidad, la misma no es sino una solución que aporta el cerebro ante los complejos problemas que le plantean nuestros ojos. Lo que ocurre cuando vemos algo no se limita a un proceso mecánico de estímulo y respuesta. Por el contrario, el cerebro se muestra muy activo a la hora de construir percepciones a partir de una escueta información proporcionada por los sentidos. Este complejo proceso suele recibir el nombre de "percepción activa" o "inteligencia visual".



6. VELOCIDAD DEL VIENTO SOLAR (*verde*). El viento más rápido prevalece a altas latitudes. Las zonas oscuras en los polos de esta imagen ultravioleta del Sol representan los agujeros coronales. Se creía que estos datos obtenidos por la sonda Ulysses, confirmaban que el viento solar rápido (si no todo el viento solar) emanaba de los agujeros coronales de los polos. Sin embargo, los agujeros de los polos que aparecen en las imágenes de luz blanca son artificios del procesado de las imágenes.

ADAPTADO DE D. J. MC COMAS, *Geophysical Research Letters*, 1998/*American Scientist*

Ver la corona y fotografiarla

Para la inteligencia visual humana, la corona solar presenta un desafío notable. Debido a su perfil en brillo y a la presencia de estructuras de pequeño contraste, caracterizadas por cambios ligeros pero abruptos en luminosidad, el complejo plasma coronal no se parece a nada que nuestros ojos hayan visto antes. Nuestra inteligencia visual evolucionó para la supervivencia, no para estudiar la corona. Su prioridad es determinar lo que tenemos delante; en función de las circunstancias, selecciona su ardid favorito y se adapta para enfatizar diferencias, cambios o contrastes. El cerebro se acomoda con facilidad a los estímulos estáticos y aprecia sólo aquello que cambia. ¿Cómo podríamos saber si ocurre lo mismo con la visión de la corona? Una método consiste en estudiar la relación entre las imágenes de la corona y la manera en que la vemos.

Las medidas cuantitativas y las imágenes que resultan de ellas no son sino representaciones diferentes de una misma observación, por lo que la relación entre ambas resulta esencial para comprender lo que vemos. En una imagen, los contornos o curvas de brillo constante se denominan *isofotas*. En la representación de la corona solar de la figura 5 se han determinado las isofotas a partir de medidas cuantitativas y se han superpuesto sobre la imagen sin procesar. Podemos apreciar que la isofota más próxima al borde de la corona sigue la forma de la misma, algo que confirma lo que ya sabemos: que la forma percibida de la corona queda determinada por la sensibilidad del instrumento que obtiene las imágenes. Por el contrario, la superposición de las mismas isofotas sobre la fotografía procesada muestra desviaciones evidentes entre las curvas y el brillo de la imagen. ¿A qué se debe semejante discrepancia?

La diferencia en la imagen procesada proviene de la sustracción de una caída promedio de densidad. Esta tiene lugar cuando se emplean los filtros con gradiente de densidad radial y también cuando se combinan varias imágenes tomadas con diferentes exposiciones. Puesto que la caída radial tiene una pendiente mayor en la región polar que en la ecuatorial, la sustracción de una caída promedio produce un déficit de brillo en la región polar y un exceso de brillo en la región ecuatorial. La forma de la corona sigue determinada por el límite de sensibilidad del instrumento, pero ahora se trata del límite de la *densidad diferencial* más que del límite de las medidas de densidad. La forma coronal aparece dentada porque la variación latitudinal en la caída radial de la densidad electrónica se encuentra exagerada en las medidas diferenciales de la

densidad. El aumento informático adicional de los gradientes de densidad revela las pequeñas estructuras en forma de rayos.

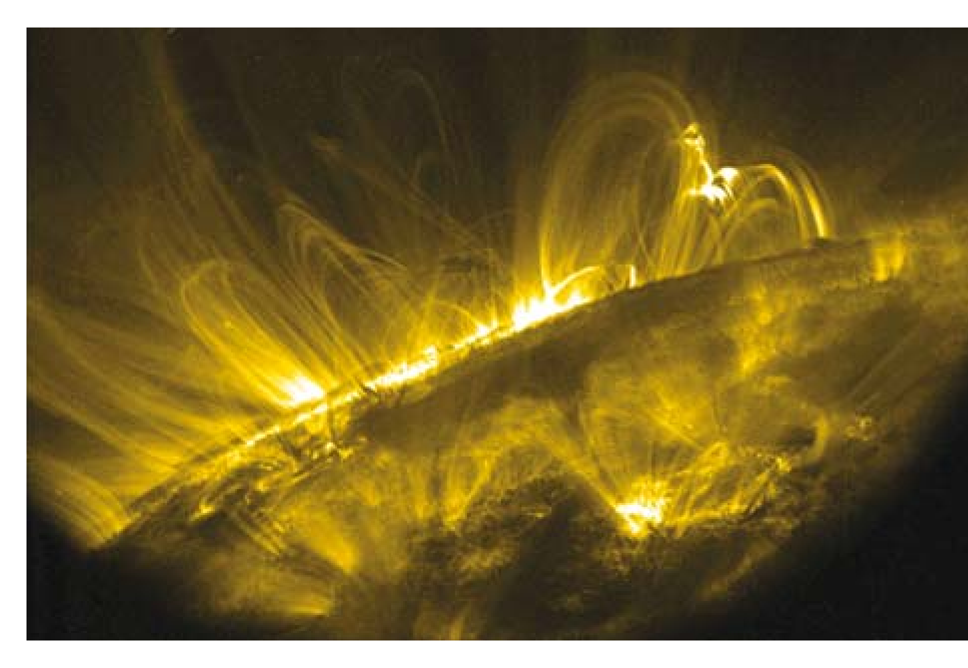
Sin percatarse de ello, las técnicas de procesado de imágenes estaban imitando los procesos de diferenciación empleados por el cerebro humano. Ello explica por qué las imágenes procesadas del tercer período de estudio de los eclipses se asemejaban tanto a las coronas representadas en los dibujos hechos a mano durante el primer período. También se diferenciaban de las imágenes no procesadas del segundo período porque, al igual que con el ojo desnudo, las imágenes procesadas representaban la densidad diferencial más que la densidad absoluta. Pero, dado que son artificios producto del proceso de diferenciación, las estructuras observadas en las imágenes procesadas no existen físicamente en la corona.

Canalizaciones en Marte

La intervención de la inteligencia visual en el estudio de la corona solar recuerda a la antigua controversia sobre las canalizaciones en Marte. A finales del siglo XIX, gran parte de la fascinación ejercida por Marte se centró en la existencia de ciertas "canalizaciones" sobre el planeta. En 1877, el astrónomo italiano Giovanni Schiaparelli observó una densa red de estructuras lineales sobre la superficie marciana a las que denominó *canali* ("canales" o "cauces"). Por algún motivo, el nombre fue traducido al inglés bajo la acepción incorrecta de *canals* ("canalizaciones") en lugar de *channels*. Semejante error implicaba una diferencia conceptual importante, ya que las "canalizaciones" sugerían una construcción artificial y la posibilidad de vida inteligente, mientras que el término "cauces" insinuaba configuraciones naturales.

Durante el primer decenio del siglo XX, el astrónomo estadounidense Percival Lowell se convirtió en un ferviente defensor de las canalizaciones artificiales y pasó gran parte de su vida intentando demostrar la existencia de vida inteligente en Marte. Finalmente, dado lo polémico del concepto, prevaleció la idea de que no se trataba más que de una ilusión óptica. En 1913, el astrónomo griego Eugène Antionadi escribió: "Se escribirán un sinfín de volúmenes para registrar el descubrimiento de nuevas canalizaciones. Pero el astrónomo del futuro despreciará semejantes milagros. Después de haber dificultado el progreso durante un tercio de siglo, la falacia de las canalizaciones está condenada a convertirse en uno de los mitos del pasado".

La inteligencia visual siempre intenta hallar patrones reconocibles, algo que consigue con peculiar maestría. Los canales marcianos permanecieron en la mente colectiva durante la primera mitad del siglo XX. Con la credibilidad de las observaciones visuales mermada, la investigación de Marte no volvió a recuperar su época dorada hasta la era espacial, cuando las imágenes tomadas por la nave *Mariner* en la década de los sesenta pusieron fin al caso de las canalizaciones.



CORTESIA DE LOCKHEED MARTIN/NASA/*American Scientist*

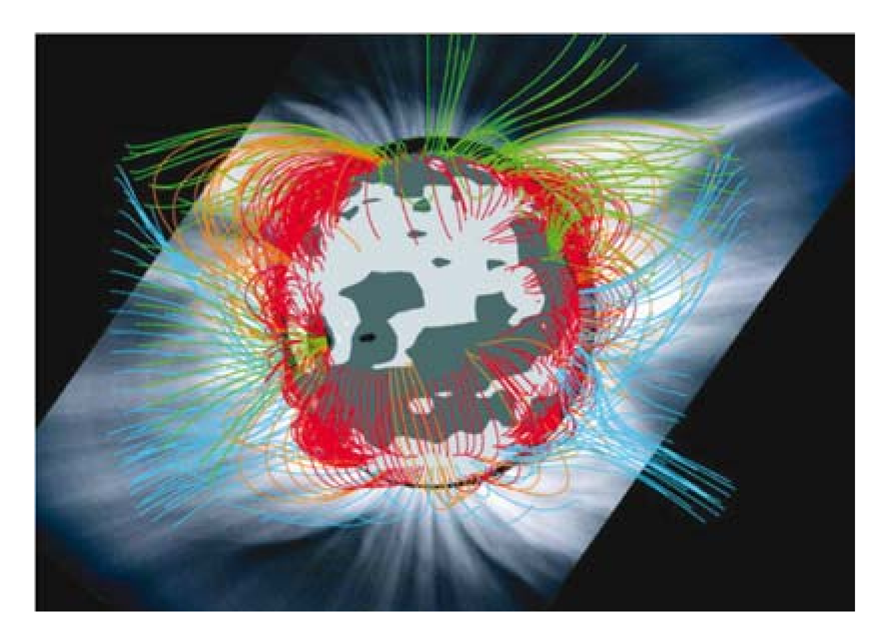
7. LAS MEDIDAS ULTRAVIOLETAS del satélite TRACE muestran bucles en la corona solar que parecen seguir líneas de campo magnético. Estos bucles atrapan el plasma, por lo que pueden fotografiarse con mayor claridad las líneas abiertas.

En 1966, Carl Sagan expresaba así su opinión sobre el daño que supuso el asunto de las canalizaciones marcianas: "Se convirtió en algo tan amargo y tan poco rentable que provocó un éxodo general de la astronomía planetaria a la astronomía estelar, amparado en gran medida por la importante oportunidad científica para aplicar la física a los problemas estelares. La escasez actual de astrónomos planetarios puede atribuirse a estos dos factores".

Nueva luz en la atmósfera solar

En 1908 el astrónomo George Hale demostró que las manchas solares correspondían a regiones en las que dominaba una intensa actividad magnética. Su descubrimiento dio paso a una serie de medidas exhaustivas del campo magnético sobre la superficie solar, la denominada fotosfera. Los resultados recogidos por los observatorios terrestres y espaciales indicaban que la interacción entre el Sol y su atmósfera ocurría a través del campo magnético solar.

En los años treinta, Bernard Lyot inventó el coronógrafo, un telescopio que ocultaba el disco solar y posibilitaba tomar imágenes de la corona sin necesidad de esperar a un eclipse. Los coronógrafos (los terrestres y los de las misiones espaciales como SOHO, el Observatorio Solar y Heliosférico, o STEREO, el Observatorio de Relaciones Solares y Terrestres) han



8. **LOS CALCULOS DE LOS MODELOS TEORICOS extrapolan los campos magnéticos observados en la superficie del Sol, la fotosfera, hacia la corona. La superposición sobre las imágenes de eclipses de los campos coronales calculados pretende validar dichos modelos. Sin embargo, no disponemos de datos sobre el campo magnético coronal, por lo que ni los modelos ni las imágenes procesadas han podido contrastarse.**

CORTESIA DE AAS, DE Y.-M. WANG ET AL., *Astrophysical Journal*, 2007/*American Scientist*

servido para observar de manera continuada la luz blanca de la corona. Ello permite seguir la propagación de perturbaciones o las eyecciones de masa coronal, a su vez relacionadas con las fulguraciones solares, las tormentas geomagnéticas y el "clima espacial" (las condiciones relativas a partículas ionizadas y radiación que rigen en las regiones próximas a la Tierra). Esto último nos resultará familiar dado su potencial para alterar las redes de suministro eléctrico, inutilizar satélites espaciales o desbaratar la telefonía móvil.

A principios de los años sesenta, la llegada de la exploración espacial confirmó una notable predicción teórica realizada por el físico solar Eugene Parker. La corona, compuesta en su mayor parte por plasma (gas ionizado), no es estática. El plasma solar fluye desde el Sol hacia el exterior, alcanza velocidades supersónicas (unos 800 kilómetros por segundo) y se dispersa por todo el sistema solar. Parker lo denominó "viento solar". Desde su descubrimiento, toda una flotilla de sondas espaciales ha explorado la heliosfera, la región del sistema solar dominada por el viento solar. Se sabe que el viento solar cuenta con varias componentes de distintas velocidades y densidades.

Al observar el Sol desde fuera de la atmósfera terrestre con sondas como SOHO, Yohkoh, Hinode o TRACE (Explorador Coronal y de la Región de Transición), los investigadores han podido capturar imágenes del Sol en rayos X blandos y en luz ultravioleta. Ello ha puesto de manifiesto una corona muy estructurada y dinámica. Los datos muestran algunas regiones solares mucho menos densas y más frías que otras. Designadas como "agujeros coronales", se muestran como zonas oscuras en el ultravioleta y los rayos X. Los oscuros agujeros coronales se hallan rodeados por regiones más brillantes que, en conjunto, reciben el nombre de "Sol en reposo", y éstas se hallan a su vez salpicadas por las regiones activas (las de las manchas solares). Los agujeros coronales aparecen en las regiones polares del Sol durante la parte menos activa del ciclo solar, pero desaparecen durante los máximos de actividad.

Orígenes del viento solar

Aunque desde su descubrimiento han sido numerosas las mediciones del viento solar, saber de dónde emana y cómo evoluciona con la distancia ha sido siempre un formidable desafío. No existe ninguna medida directa de la fuente del viento solar. Si bien se piensa que el campo magnético puede jugar algún papel, no disponemos de medidas que definan ni la distribución global del campo magnético ni el flujo de plasma en la corona. Ante este dilema, los investigadores del viento solar buscaron las claves en las imágenes de la corona.

Al igual que las limaduras de hierro se acumulan a lo largo de las líneas del campo magnético que rodean a un imán, la estructura que se manifiesta en la emisión y la luz blanca de las imágenes procesadas dan la impresión de trazar las líneas del campo magnético coronal. Sin embargo, sin las medidas correspondientes del campo magnético, el trazado magnético de las imágenes coronales no puede ser validado de manera directa.

Apenas hay dudas de que los llamativos bucles de las imágenes de alta resolución obtenidas con TRACE en el ultravioleta representan bucles (líneas que regresan de nuevo al Sol) de campo magnético. Pero ¿por qué no podemos ver líneas abiertas (líneas que se extienden hacia el espacio interplanetario), las cuales deberían ser las más relevantes para el flujo de viento solar? ¿Son los bucles más patentes debido a una mayor emisión y brillo del plasma atrapado en ellas?

No poder justificar la emisión y las imágenes de la luz blanca como los trazadores del campo magnético solar constituye uno de los puntos débiles a la hora de emplearlas para el estudio del viento solar. Pero nuestra incapacidad para entender las propias imágenes procesadas supone el mayor de todos los errores. Se cree que las medidas de la velocidad del viento solar efectuadas por la misión Ulysses confirman e ilustran los principios actuales sobre el viento solar. Según ellos, la componente rápida del viento solar —si no todo el viento— se origina en los agujeros coronales de los polos durante el mínimo de actividad. Ya que el viento diverge en vez de extenderse radialmente, su expansión se denomina suprarradial. Pero una expansión suprarradial desde los agujeros de los polos coronales se basa en

la falsa impresión, procedente de las imágenes procesadas, de que los rasgos a gran escala sugieren unos agujeros coronales divergentes en los polos.

Desafortunadamente, esta imagen equivocada del origen y evolución del viento solar ha sido la base de los estudios sobre el viento solar durante más de tres décadas. Asimismo, se ha perpetuado con los modelos teóricos inspirados por (y replicadores de) una idea extraída a partir de una mala interpretación de las imágenes procesadas de luz blanca. Extrapolar las observaciones del campo magnético fotosférico a la heliosfera implica un modelo del campo magnético. Aunque el mismo ha sido contrastado con medidas *in situ* del campo magnético del viento solar lejano, no han sido validados en el interior de la corona.

Más escollos en las imágenes

Supongamos una situación hipotética en la que el amplio intervalo dinámico del brillo coronal que dificulta las imágenes deja de existir. La imagen procesada del eclipse constituye un reflejo de la densidad y no de una densidad diferencial; las medidas del campo magnético son posibles y legitiman las imágenes de la corona como trazadores del campo magnético; finalmente, la imagen presenta una corona con unas estructuras en forma de rayos filamentosos y radiales. Además, supongamos que existe otro conjunto de estructuras radiales que trazan el campo magnético en otras regiones. Ambos son idénticos, pero convergen en un punto ligeramente por encima o por debajo del centro del Sol.

La figura 9 representa la superposición de tales conjuntos hipotéticos de rayos, idénticos pero ligeramente desplazados. Lo sorprendente es la aparición espontánea de un patrón dipolar, el cual se torna mucho más notable cuando se procesa la imagen para resaltar el gradiente de densidades. Dicha imagen no refleja la estructura del campo magnético, como demostrarían las medidas del campo magnético coronal y de la densidad coronal. No se trata sino de una ilusión óptica creada por la interacción de estructuras vecinas repetidas que se conoce bajo el nombre de patrón de Moiré. La misma fue estudiada por el biofísico y artista visual Gerald Oster en los años sesenta.

Remediar los errores

Parece claro que el origen y evolución del viento solar no pueden determinarse con imágenes, ya que es imposible obtener imágenes de la corona libres de artificios. Es más, incluso si fuera posible, deducir los campos y el flujo a partir de imágenes de densidad depende de la relación que exista entre el campo magnético, el flujo de plasma y la densidad electrónica. Del mismo modo, legitimar las imágenes de luz blanca como trazadores de campo y de flujo resulta inviable sin medidas de los campos o del flujo coronal. Por tanto, es imprescindible atacar el problema de una manera diferente.

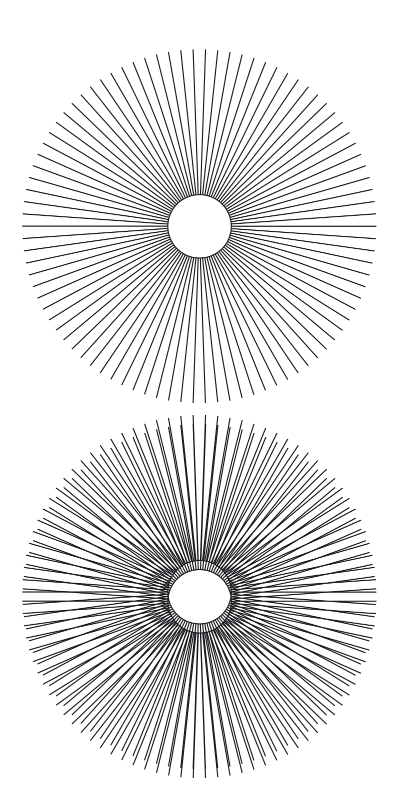
La densidad del plasma es el único parámetro del viento solar que ha sido observado profusamente en la corona (mediante mediciones remotas) y en el viento solar (tanto con mediciones remotas como *in situ*). Un enfoque natural consiste en explorar la expansión del viento solar a partir de la densidad de plasma a medida que el viento solar se aleja del astro. Tal y como sugieren las isofotas de la figura 5, parece que la densidad se dispersa en todas las direcciones.

Cuando una nave espacial vuela por detrás de la corona según ésta se ve desde la Tierra, las señales de radio enviadas por la nave atraviesan la corona; las medidas del retraso temporal y de los cambios de fase en esas señales proporcionan información sobre la densidad electrónica. Las mediciones de este tipo realizadas con la sonda Ulysses han demostrado que la huella del Sol parece extenderse de manera radial en el viento solar. Estos resultados observacionales son robustos y apuntan a que la expansión es radial y que el viento emana de todo el Sol, no sólo de los agujeros coronales de los polos.

Este procedimiento es riguroso porque no depende de las imágenes. Tampoco asigna ningún papel a unos campos magnéticos que nadie ha medido. En su lugar, hace uso de observaciones de densidad realizadas con las señales de radio de las naves espaciales. Estas, debido a su sensibilidad y resolución extraordinarias, complementan las mediciones ópticas. Las medidas de radio también se han mostrado fundamentales a la hora de comprender las estructuras que se deducen de los datos de luz blanca y los de radio. Incluso si se enviara una nave al Sol para realizar múltiples pasadas a través de la corona interior —algo irrealizable—, la tarea de identificar y resolver las variaciones observadas en las medidas de los campos y las partículas sería aún enorme. La determinación definitiva de la fuente del viento solar con medidas coronales *in situ* sigue constituyendo, a fecha de hoy, un gran desafío.

Aprender del pasado

Es sorprendente saber que, después de casi medio siglo de exploración, seguíamos equivocados sobre la fuente y la evolución del viento solar. Ya Eugene Parker reconoció esta posibilidad. En 2001 concluyó su revisión de la historia del viento solar de la siguiente manera:



9. EL PATRON DE MOIRE está generado a partir de la interacción entre estructuras repetidas y vecinas. Aquí se superponen dos conjuntos idénticos de estructuras radiales uniformemente distribuidas, una de ellas ligeramente desplazada en la dirección vertical. La imagen demuestra que el patrón dipolar de la corona solar bien podría corresponder a una ilusión óptica.

AMERICAN SCIENTIST

El autor

Richard Woo es investigador científico emérito del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA en el Instituto Tecnológico de California, Pasadena (California). Se ha dedicado durante más de 45 años al estudio de la estructura y dinámica de las atmósferas solar y planetaria.

Bibliografía complementaria

A HISTORY OF THE SOLAR WIND CONCEPT. E. N. Parker en *The century of space science*, vol. I, págs. 225-255; dirigido por J. A. M. Bleeker, J. Geiss y M. C. E. Huber. Kluwer Academic Publishers; Dordrecht, 2001.

RELATING WHITE-LIGHT CORONAL IMAGES TO MAGNETIC FIELDS AND PLASMA FLOW. R. Woo en *Solar Physics*, vol. 231, págs. 71-85; 2005.

SOLAR ECLIPSE IMAGES AND THE SOLAR WIND. R. Woo y H. Druckmüllerová en *Astrophysical Journal*, vol. 678, págs. L149-L152; 2008.

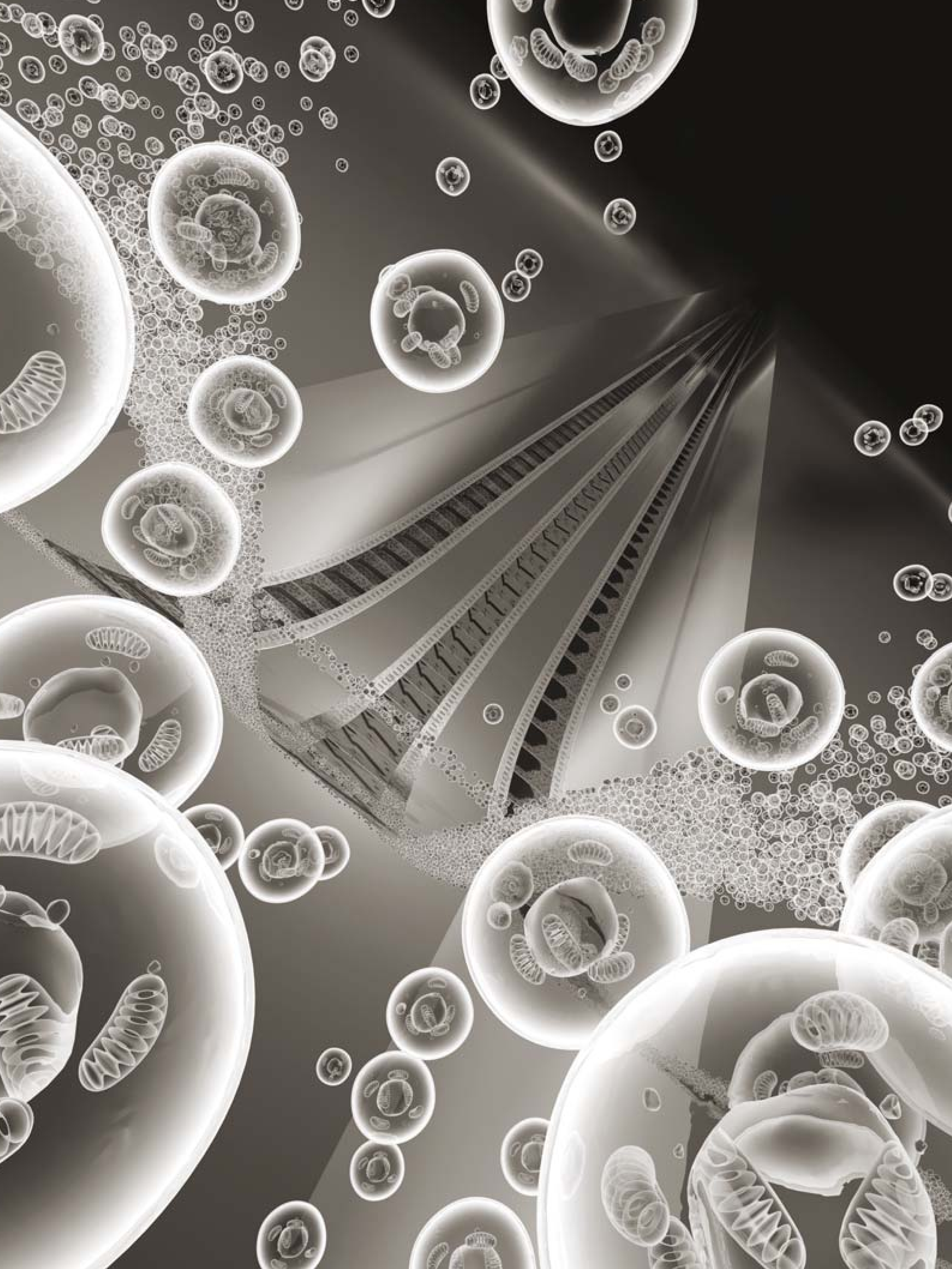
SOLAR ECLIPSES AS AN ASTROPHYSICAL LABORATORY. J. M. Pasachoff en *Nature*, vol. 459, págs. 789-795; 2009.

"[...] la historia de los conceptos que han conducido a nuestra comprensión actual y limitada del viento solar se remonta al reconocimiento de la existencia del espacio y de los campos magnéticos, unos 2000 años atrás. Si esta larga historia nos ha enseñado algo, es que la familiaridad con cualquier campo particular de la física no debe emplearse para acotar dicho campo. Con frecuencia, el experimento y la observación transforman por completo viejos principios. No importa cuánto ni por cuánto tiempo hayamos pensado sobre un fenómeno. Siempre existirán nuevas facetas que serán descubiertas gracias al examen fresco de otro individuo. Esto es lo fascinante de la ciencia verdadera. Quiere decir que ningún científico se convertirá en el experto final y que ningún experto autoproclamado puede trabajar con la misma eficacia que un investigador."

El filósofo e historiador de la ciencia Douglas Allchin entiende que errar es hacer ciencia y que la misma no es sino un proceso de error y corrección. Pero, tal y como él mismo apunta, ni la equivocación se anuncia a sí misma ni la corrección es automática. El caso del viento solar supone un claro ejemplo. El error se descubrió tras medio siglo de exploración de la densidad coronal a partir de medidas de ocultaciones de señales de radio. Y la solución de dicho error requirió, tras un siglo y medio de estudio de eclipses, aclarar la relación entre las imágenes y la inspección visual de la corona.

A pesar de tratarse de datos científicos, las imágenes nunca han sido sometidas al mismo escrutinio que las medidas cuantitativas. Parece evidente que las consideraciones sobre la idoneidad de las imágenes, sus aplicaciones, su legitimidad y los problemas técnicos asociados no han sido tenidos en cuenta casi nunca. Además, ha habido muy poca discusión sobre las limitaciones de la sensibilidad y resolución tanto de la representación como de la reproducción de las imágenes, así como sobre el uso de filtros de densidad radiales y sobre las técnicas de procesado. Sin duda, existe una falta de estudio sobre la función de la fotografía en la ciencia, algo que ha sido discutido por la historiadora Holly Rothermel.

La sumisión a las imágenes parece ser un producto de la era visual en la que vivimos. Las imágenes pueden ayudar, pero también perjudicar. Tanto si las empleamos para estudios como para representaciones científicas, es imperativo que cuestionemos y contrastemos la información que aportan.



MICROSCOPIA ELECTRONICA ULTRARRAPIDA

Una nueva técnica de microscopía permite obtener "fotogramas" de procesos nanoscópicos en escalas de tiempo de femtosegundos

AHMED H. ZEWAIL

La visión del ojo humano es limitada. No podemos ver objetos mucho más finos que un cabello (una fracción de milímetro) o resolver movimientos más rápidos que un parpadeo (una décima de segundo). Es cierto que los avances en óptica y microscopía del pasado milenio han sobrepasado esos límites y nos han brindado imágenes exquisitas, como micrografías de virus o fotografías estroboscópicas de una bala durante el milisegundo en el que atraviesa una bombilla. Sin embargo, si hace tan sólo unos años alguien nos hubiera mostrado una filmación de átomos en vibración, habríamos podido asegurar que nos hallábamos ante una simulación o ante la obra de un artista.

En el último decenio, nuestro grupo de investigación en el Instituto de Tecnología de California (Caltech) ha desarrollado una nueva técnica de obtención de imágenes que logra resolver movimientos a escalas atómicas y en intervalos de tiempo tan pequeños como un femtosegundo (10^{-15} segundos). Puesto que dicha técnica se basa en el microscopio electrónico y, además, permite obtener imágenes a lo largo del espacio y del tiempo, decidimos bautizarla como "microscopía electrónica en cuatro dimensiones" (4D). Gracias a ella hemos logrado filmar la vibración de láminas de átomos de carbono en muestras de grafito tras ser percutidas por un pulso láser, la transformación de la materia de un estado a otro o células y proteínas aisladas.

La microscopía electrónica en 4D promete responder a preguntas que abarcan diferentes campos, desde la física de materiales hasta la biología. Nos permitirá comprender las propiedades macroscópicas de los materiales a partir de su comportamiento atómico, el funcionamiento de dispositivos de escala nanométrica o procesos clave de la actividad celular, como la manera en que las proteínas y otras moléculas se organizan en estructuras mayores. En principio, la microscopía electrónica en 4D también debería filmar las trayectorias de los electrones alrededor de átomos y moléculas en escalas de tiempo de attosegundos (10^{-18} segundos). Además de todos estos avances en ciencia básica, sus aplicaciones potenciales se muestran enormes. Algunas incluyen el diseño de nanomáquinas o el de nuevos fármacos.

Gatos y átomos en movimiento

Aunque la microscopía en 4D es una técnica puntera basada en la mecánica cuántica y desarrollada gracias a los láseres más modernos, muchos de sus principios pueden entenderse a partir de las técnicas fotográficas de paso de manivela (*stop motion*), desarrolladas hace más de cien años para la animación cinematográfica. Ya en torno a 1890, Étienne-Jules Marey, catedrático del Colegio de Francia, hizo uso de dicha técnica con el objeto de tomar series de fotografías de movimientos muy rápidos. Para ello empleó un disco con rendijas que giraba rápidamente entre el objeto en movimiento y una placa fotográfica. La serie de exposiciones resultantes producía un resultado similar al de la filmación de películas modernas.

Una de las investigaciones llevadas a cabo por Marey consistió en registrar los movimientos de un gato que caía y aterrizaba de pie.

CONCEPTOS BASICOS

- La microscopía electrónica ultrarrápida permite "rodar películas" de procesos nanoscópicos que ocurren en intervalos de tiempo de tan solo femtosegundos (10^{-15} segundos).
- Cada fotograma se genera a partir de miles de disparos individuales tomados en tiempos definidos de forma muy precisa.
- Sus aplicaciones abarcan un amplio abanico de disciplinas, desde la ciencia de materiales hasta la medicina.

BRYAN CHRISTIE DESIGN

¿Cómo logran los felinos ejecutar semejante acrobacia sin violar las leyes de Newton? La caída dura menos de un segundo, demasiado rápido para que el ojo desnudo consiga resolver lo que ocurre. Las instantáneas de Marey proporcionaron la respuesta: el animal tuerce los cuartos traseros en dirección opuesta a los delanteros, estira las patas y gira para caer de pie. Hoy en día también los saltadores de trampolín, bailarines y astronautas aprenden movimientos similares para girar sobre sí mismos.

Otra técnica, la fotografía estroboscópica, emplea rápidos destellos de luz para capturar movimientos en escalas de tiempo mucho más cortas que las que registran los obturadores mecánicos. Durante un instante, los destellos tornan visible (ya sea para el ojo o para una placa fotográfica) un objeto que se mueve en la oscuridad. Esta técnica experimentó un gran avance a mediados del siglo xx, cuando Harold Edgerton, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, desarrolló *flashes* electrónicos estables que emitían destellos periódicos y de sólo microsegundos de duración.

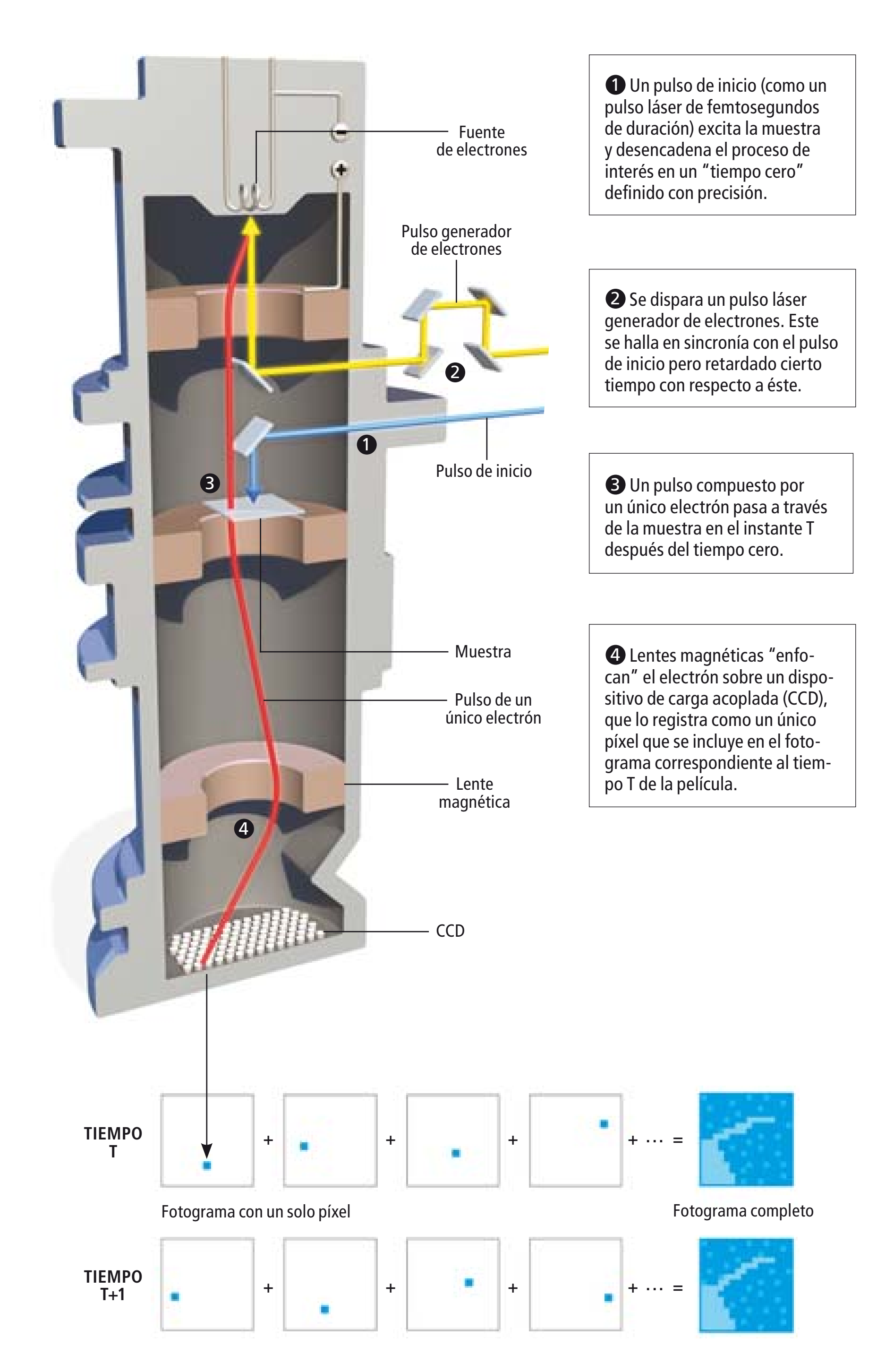
El experimento del gato requiere tiempos de obturador o destellos estroboscópicos lo bastante cortos como para que las fotografías muestren nítidamente al animal a pesar de su rápido movimiento. Supongamos que el gato se ha enderezado medio segundo después de haber comenzado a caer. La velocidad del gato en ese momento es de cinco metros por segundo. Si empleamos destellos de un milisegundo, el gato no caerá más de cinco milímetros durante cada exposición y las imágenes apenas aparecerán borrosas. Para mostrar las acrobacias en 10 instantáneas, las fotografías deben ser tomadas cada 50 milisegundos.

¿Cuán rápidos han de ser nuestros destellos estroboscópicos si queremos observar una molécula en vez de un felino? En numerosos procesos moleculares el desplazamiento de los átomos no excede unos pocos angstrom (10^{-10} metros), por lo que resolver un movimiento semejante requiere una resolución espacial inferior al angstrom. Además, la velocidad característica de un átomo es del orden de un kilómetro por segundo. Ello implica que, para obtener una resolución de 0,1 angstrom, hacen falta destellos estroboscópicos de unos 10 femtosegundos de duración.

Alrededor de 1980 ya se empleaban pulsos láser de femtosegundos para medir la duración de procesos químicos. Sin embargo, resultaba imposible observar las posiciones de los átomos en el espacio, ya que la longitud de onda de la luz es cientos de veces mayor que las distancias interatómicas [*véase* "La formación de las moléculas", por Ahmed H. Zewail; Investigación y Ciencia, febrero 1991].

UN MICROSCOPIO ELECTRONICO EN CUATRO DIMENSIONES

Un microscopio electrónico tradicional toma imágenes estáticas de una muestra nanoscópica. Para ello, envía un haz de electrones a través de dicha muestra y lo focaliza sobre un detector. Mediante pulsos que constan de un único electrón, un "microscopio electrónico en cuatro dimensones" incorpora la evolución temporal y genera fotogramas en intervalos de tiempo de femtosegundos (10^{-15} segundos).



▲ Cada fotograma se genera mediante la repetición del proceso miles de veces, todas ellas con el mismo tiempo de retardo. Después se combinan todos los píxeles en una imagen. Es posible utilizar el microscopio con pulsos de muchos electrones, pero el modo de pulsos de un electrón produce la mejor resolución espacial y captura los intervalos de tiempo más cortos.

Por otra parte, hace ya tiempo que los microscopios electrónicos emplean electrones acelerados para generar imágenes a escalas atómicas. Pero la técnica sólo es efectiva con blancos estáticos y en intervalos de tiempo superiores al milisegundo. En resumen, las filmaciones a escalas atómicas que buscábamos requerían la resolución espacial de un microscopio electrónico pero con pulsos electrónicos ("pulsos sonda") de femtosegundos de duración para "iluminar" los blancos.

Otra cuestión consiste en registrar el instante en que comienza el movimiento, ya que no obtendremos imágenes útiles si todos los pulsos sonda toman instantáneas antes de que el movimiento empiece o después de que termine. Al fotografiar el gato, la grabación empieza cuando el gato es liberado. En el caso de una filmación ultrarrápida se necesita un pulso de inicio, también de femtosegundos de duración, que ponga en marcha el proceso en cuestión.

Pero incluso cuando los pulsos sonda y el de inicio se hallan bajo control, aún queda controlar la sincronización. Este es el punto en que la microscopía ultrarrápida se aparta por completo de su analogía felina. En principio, Marey podía completar su experimento lanzando el gato una sola vez. Y no importaba mucho si la serie de exposiciones comenzaba cinco, diez o diecisiete milisegundos después de que el gato fuera liberado.

La microscopía ultrarrápida forma imágenes completas mediante la repetición de un experimento miles de veces. Imaginemos que Marey se hubiera visto limitado a fotografiar cada vez sólo una estrecha franja vertical del campo de visión. Para reconstruir la serie completa de instantáneas hubiera debido repetir el experimento un sinnúmero de veces y, cada vez, fotografiar una franja vertical diferente. Pero, para poder combinar después todas las franjas en una misma imagen, hubiera necesitado colocar al gato en la misma posición inicial antes de cada lanzamiento y, además, sincronizar con sumo cuidado (y cada vez de la misma manera) el inicio de movimiento con las aperturas del obturador. Semejante técnica requeriría, además, que el gato se moviese de la misma forma en cada lanzamiento. Por fortuna, en este particular las moléculas son más fiables que los gatos.

Las configuraciones iniciales deberían afinarse con una precisión igual a una pequeña fracción del tamaño del gato, y el tiempo de sincronización debería precisarse hasta una escala inferior a la duración de las aperturas del obturador. Del mismo modo, la microscopía ultrarrápida de átomos o moléculas requiere una configuración de inicio afinada hasta escalas inferiores al angstrom y una sincronización entre los pulsos sonda y el pulso de inicio con exactitud de femtosegundos. Dicha sincronización entre pulsos se consigue enviando uno de ellos a lo largo de un camino de longitud ajustable. Para un pulso que viaja a la velocidad de la luz, modificar la longitud del camino en una micra se corresponde con una diferencia de 3,3 femtosegundos en la separación entre pulsos.

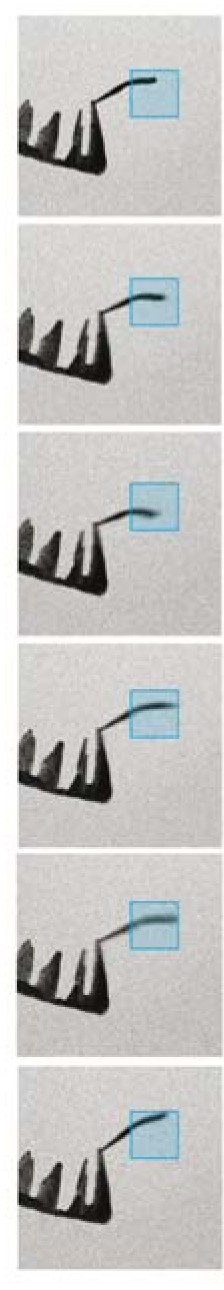
Aún queda por superar un problema de gran importancia antes de que podamos rodar películas con electrones. A diferencia de los fotones, los electrones están dotados de carga eléctrica y se repelen entre sí, por lo que, al juntar muchos de ellos en un pulso, éste se dispersa y se arruina la resolución espacial y temporal del experimento. En los años ochenta, Oleg Bostanjoglo, de la Universidad Técnica de Berlín, consiguió formar imágenes con pulsos que contenían tan sólo 100 millones de electrones. Pero las máximas resoluciones obtenidas no excedían el nanosegundo y el micrómetro. Con posterioridad, investigadores del Laboratorio Nacional Lawrence de Livermore las mejorarían hasta el nivel submicrométrico.

La solución de nuestro grupo fue desarrollar la microscopía de un único electrón, basada en nuestro trabajo previo sobre difracción de electrones ultrarrápidos. Cada pulso sonda contiene un electrón y, por tanto, proporciona un solo "punto de luz" en la imagen final. Gracias a una sincronización cuidadosa de cada pulso y a otra propiedad conocida como coherencia del pulso, los numerosos puntos se suman para formar una imagen útil del objeto. Se trata de un fenómeno similar al experimento de la doble rendija en mecánica cuántica: aunque los electrones pasan uno a uno a través de las dos rendijas y cada uno contribuye a un único punto aleatorio en la pantalla de detección, el conjunto de todos esos puntos forma franjas de luz y oscuridad en un patrón predecible.

La formación de imágenes con un único electrón fue la clave de la microscopía electrónica ultrarrápida en 4D. Una vez superada esta dificultad, la filmación del movimiento de átomos y moléculas ya resultaba factible.

Dinámica de nanomateriales

Uno de nuestros primeros objetos de estudio fue el grafito, el material del que se encuentran hechos los lápices. La razón para ello fue que el grafito es un material en cierto modo inusual, con aplicaciones en entornos tan extremos como los reactores nucleares y con parientes cercanos, como el grafeno o el diamante, igual de notables. El grafito presenta una estructura

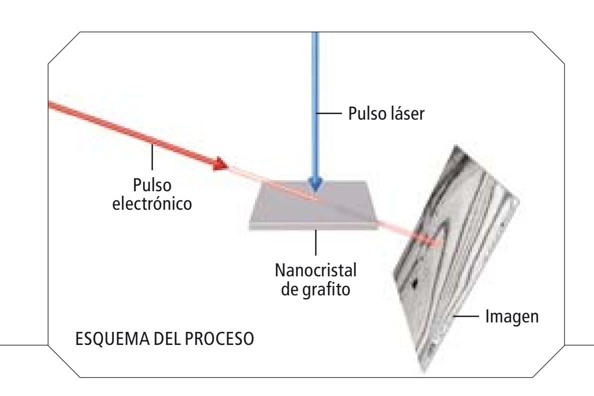


▲ Una nanopalanca de níquel y platino de unos 50 nanómetros de extensión oscila después de ser excitada por un pulso láser. Los cuadros azules destacan el movimiento. La filmación completa consta de un fotograma cada 10 nanosegundos. La determinación de las propiedades del material a partir de estas oscilaciones servirán para mejorar el diseño de dispositivos nanomecánicos. Puede verse la filmación completa en **ScientificAmerican.com/aug2010/nanomovies**.

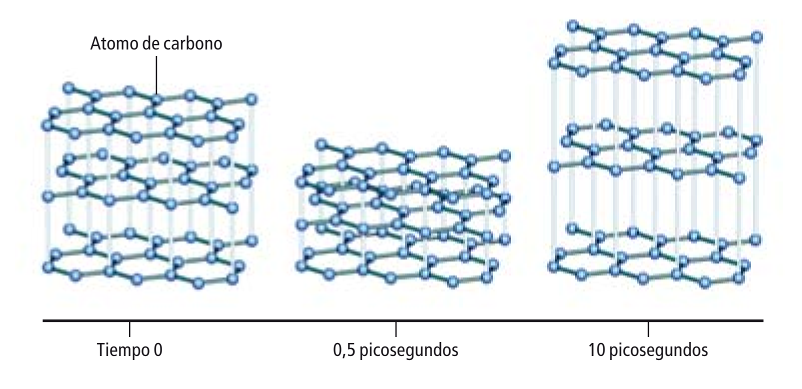
GEORGE RETSECK (*ilustraciones*); CORTESIA DEL INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE CALIFORNIA (*fotogramas*)

UNA PIEDRA DE ROSETTA NANOSCOPICA

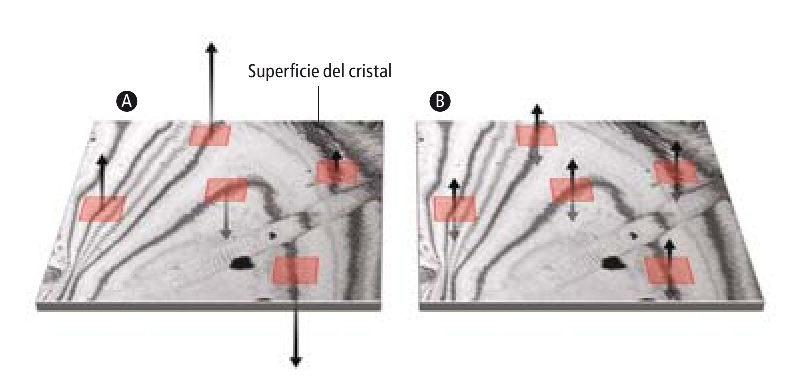
La microscopía ultrarrápida de nanocristales de grafito, algunos de ellos con el grosor de pocas capas atómicas, pone de manifiesto la utilidad de las diferentes técnicas de formación de imágenes. En el experimento se analizaba la respuesta de los nanocristales cuando un pulso láser incidía sobre ellos.



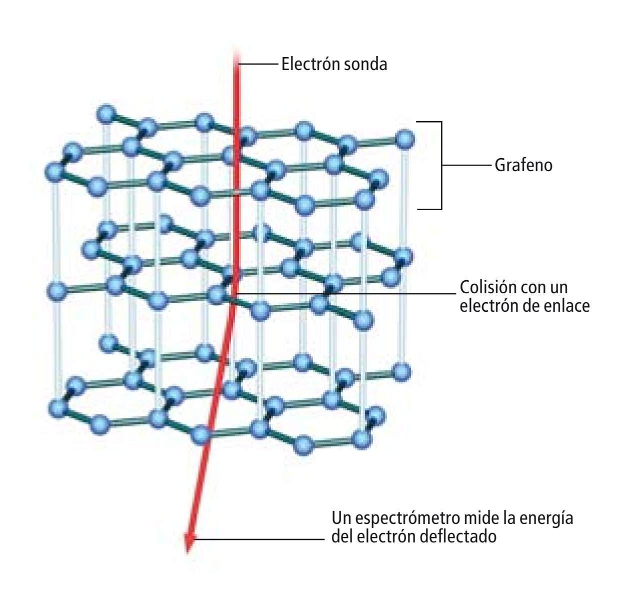
❶ Los patrones de difracción revelaron el movimiento de oscilación de las capas del cristal. Las oscilaciones comenzaron picosegundos después de haber sido percutidas por el pulso láser y se mantuvieron durante centenas de picosegundos.



❷ Las imágenes del nanocristal midieron el desplazamiento de las oscilaciones a lo largo de la muestra. En decenas de microsegundos, el movimiento inicialmente caótico del cristal Ⓐ evolucionó hacia un movimiento oscilatorio coordinado de todo el cristal Ⓑ.



❸ Las medidas de la energía perdida por los electrones sonda tras sus colisiones con la muestra indicaron el modo en que los enlaces entre los átomos de carbono se asemejaban a los del diamante durante la compresión de las capas de grafito y a los del grafeno (una sola capa de átomos de carbono) durante la expansión.



▲ Los fotogramas de la película muestran al nanocristal de grafito oscilando como el parche de un tambor después de haber sido percutido por una baqueta. Las imágenes muestran un área de 24 micrómetros de anchura en intervalos de 250 nanosegundos. Al combarse, aparecen en la superficie del grafito las bandas negras, las cuales se mueven a medida que la superficie oscila (los cuadros rojos se han superpuesto para destacar el movimiento). Puede ver la filmación completa en **ScientificAmerican.com/aug2010/nanomovies**.

GEORGE RETSECK (*ilustraciones*); CORTESIA DEL INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE CALIFORNIA (*fotogramas*)

laminar: se encuentra formado por una sucesión de capas de átomos de carbono apiladas unas sobre otras. En cada una de las capas los átomos se disponen según un patrón hexagonal. Los enlaces que unen los átomos en una misma capa son muy fuertes, mientras que los que unen dos capas contiguas son relativamente débiles. De hecho, escribir con un lápiz no es sino desprender fragmentos de grafito que se adhieren al papel. En las marcas que deja un lápiz también hay presentes pequeñas cantidades del material más resistente conocido: el grafeno, el cual consiste en una única capa (de un átomo de espesor) de átomos de carbono dispuestos de forma hexagonal. Hoy en día el grafeno es objeto de intensas investigaciones debido a su amplio rango de aplicaciones electrónicas [*véase* "Electrónica del grafeno", por J. González Carmona, M. A. Hernández y F. Guinea; Investigación y Ciencia, septiembre de 2010]. Por otra parte, bajo presiones extremas, los átomos en el grafito se reordenan para formar diamante, una de las sustancias más duras que se conocen.

Para estudiar la respuesta del grafito a estímulos mecánicos, escogimos cristales nanoscópicos de esta sustancia (algunos de ellos del grosor de unas pocas capas de átomos) y los percutimos con intensos pulsos láser de femtosegundos de duración. Los pulsos láser, que a su vez funcionaban como pulsos de inicio, generaban oscilaciones en las capas del grafito. Nuestro microscopio electrónico mandó sus electrones a través de las capas de grafito en oscilación para producir dos tipos de imagen: una imagen en el espacio real (muy parecida a una fotografía de la superficie del grafito) y un patrón de difracción (una distribución regular de puntos cuya disposición nos informa sobre la colocación de los átomos en la red de grafito). En particular, logramos seguir la oscilación de las capas del grafito gracias a los movimientos de los puntos en el patrón de difracción. La frecuencia de las oscilaciones era de entre 10 y 100 gigahertz (entre 10^{10} y 10^{11} ciclos por segundo). Ningún experimento previo había observado la evolución en el tiempo de resonancias de frecuencias tan elevadas.

A partir de nuestras medidas logramos determinar la elasticidad del grafito en la dirección perpendicular a los planos atómicos; esto es, la respuesta del material a las fuerzas de compresión o estiramiento a lo largo de esa dirección. Si pensamos en el cristal de grafito como una pila de placas metálicas rígidas conectadas por muelles, lo que nosotros medimos fueron las propiedades de los muelles.

La analogía con las capas metálicas resulta válida siempre que nuestra "cámara" enfoque lo bastante cerca como para resolver la separación entre capas. Sin embargo, si la cámara "retrocede", observaremos una porción mayor del cristal. Cuando el láser incida en una región de la capa superior, observaremos cómo la compresión y expansión de las capas se propaga a modo de onda a lo largo de toda la superficie.

Cuando alejamos aún más la cámara y grabamos las imágenes con mayor lentitud, vimos cómo aparecía otro tipo de dinámica: el pulso láser hacía oscilar todo el cristal, como le ocurre al parche de un tambor tras ser golpeado por una baqueta. Durante los primeros microsegundos después del impacto del pulso láser, el movimiento del cristal se mostraba caótico. Sin embargo, algo después, se estabilizó en una resonancia bien definida.

Para este tipo de oscilaciones, la propiedad del material que establece la frecuencia de resonancia es la elasticidad de las capas del grafito (su respuesta al estiramiento o la compresión a lo largo del mismo plano). Nuestros experimentos pusieron de manifiesto que el grafito exhibe una mayor resistencia ante deformaciones en la dirección paralela a los planos atómicos que en la dirección perpendicular. Este resultado se debe a que los enlaces químicos que unen los átomos en cada capa hexagonal son mucho más fuertes que los enlaces que unen dos planos adyacentes.

Si bien los estudios llevados a cabo con muestras voluminosas de grafito producen datos similares referentes a su elasticidad, nuestros experimentos con muestras nanométricas aportan mucha más información, ya que responden a dos cuestiones fundamentales en física de materiales. Primera, ¿a qué escala de longitud deja de ser adecuado describir una sustancia como un material continuo (y, por tanto, con propiedades como la elasticidad)? Y segunda, ¿es posible reproducir las propiedades macroscópicas de un material a partir del comportamiento que éste presenta a escalas atómicas de longitud y tiempo? En el caso del grafito hemos visto que muestras nanoscópicas, con un grosor de tan sólo unas pocas docenas de átomos, se comportaban de manera sorprendentemente parecida a una muestra macroscópica. ¿Sería esta descripción válida en el caso límite del grafeno (una capa de grafito, de un átomo de espesor)?

En la clase de experimentos descritos hasta ahora, los electrones sonda no pierden energía tras haber impactado contra la muestra (de forma similar a cuando una bola de goma rebota sobre una superficie dura). Sin embargo, existen casos en los que un electrón sonda choca contra la muestra de carbono, excita a un electrón en un átomo y pierde energía. La

Al incorporar el tiempo, las imágenes estáticas se convierten en filmaciones que permiten observar la evolución de la materia en escalas que van desde el átomo hasta la célula

El autor

Ahmed H. Zewail recibió el premio Nobel de Química en 1999 por sus estudios sobre los estados de transición de las reacciones químicas mediante la espectroscopía de femtosegundos. Actualmente trabaja en el Instituto de Tecnología de California, donde es profesor de física, ocupa la cátedra de química Linus Pauling y dirige el Centro de Biología Física para Ciencia y Tecnología Ultrarrápida. En 2009 fue designado consejero de ciencia y tecnología del presidente de Estados Unidos y fue nombrado primer Enviado Científico de EE.UU. en Oriente Medio.

Esta técnica ha permitido obtener imágenes de membranas celulares y de vesículas de proteínas con resoluciones de nanómetros y femtosegundos

cantidad de energía perdida depende del tipo de enlace químico del que tomase parte el electrón contra el que impactó. Una técnica muy antigua, la espectroscopía electrónica de pérdidas de energía, mide este tipo de pérdidas; el espectro de energía proporciona información sobre los enlaces químicos de un material y los elementos que lo componen. Nuestro grupo empleó este método a la par que el microscopio electrónico ultrarrápido y mostró que, durante la fase de compresión, los enlaces en el grafito se asemejaban a los enlaces característicos del diamante. Por el contrario, durante la fase de expansión los enlaces guardaban mayor semejanza con el grafeno. La tradicional espectroscopía electrónica de pérdidas de energía es demasiado lenta para observar estos cambios.

Nanopalancas y células

Además del grafito, nuestro grupo ha aplicado la microscopía electrónica en 4D al estudio de numerosos materiales. En particular, analizamos la evolución de la estructura cristalina del hierro cuando pasa de la estructura cúbica centrada en el cuerpo a la cúbica centrada en las caras. Se trata de un proceso de interés que tiene lugar en numerosas aplicaciones industriales a altas temperaturas, como la producción de acero.

Al calentar una muestra de hierro desde temperatura ambiente hasta unos 1500 K en un nanosegundo, observamos dos procesos dinámicos. En primer lugar, los núcleos de la fase centrada en las caras se formaron con bastante lentitud (en escalas de nanosegundos) a partir de los movimientos incoherentes de los átomos de hierro. Pero, una vez formadas, estas regiones de la nueva fase crecieron por el material a la velocidad del sonido, con lo que llenaron toda la muestra al cabo de unos picosegundos (10^{-12} segundos). Una propagación tan rápida se debe al desplazamiento coordinado de numerosos átomos, lo que pone de manifiesto la curiosa "emergencia" de un cambio a gran escala a partir de los innumerables movimientos nanoscópicos subyacentes. Una comprensión en profundidad de este fenómeno podría conducir a formas mejores de manipular el hierro y el acero, así como otros materiales, en los procesos industriales.

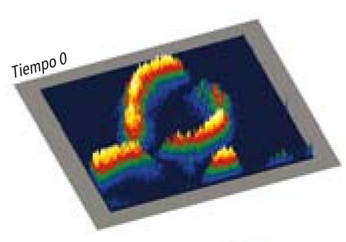
Una de las aplicaciones más potentes de la microscopía electrónica ultrarrápida consiste en observar el funcionamiento a tiempo real de nanosistemas o microsistemas. Por ejemplo, hemos filmado las oscilaciones resonantes de nanopalancas (voladizos nanométricos, empleados en numerosos dispositivos), algo que nunca se había conseguido con anterioridad para movimientos de tan alta frecuencia. Nuestros resultados permitieron determinar un conjunto de cantidades que describían las propiedades del material y sus oscilaciones. Comprobamos que su funcionamiento era coherente durante unas 10^{11} oscilaciones. Estos datos sirven para poner a prueba los modelos teóricos del diseño de sistemas electromecánicos de tamaño nanométrico, lo que servirá para el diseño de nuevos dispositivos o para mejoras en los ya existentes.

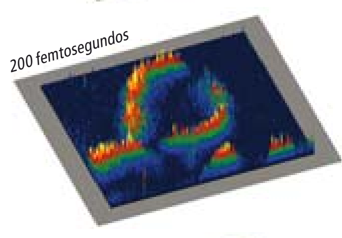
La formación de imágenes mediante microscopía electrónica ultrarrápida también presenta potenciales aplicaciones en biología. Un entendimiento completo sobre el funcionamiento de nuestro cuerpo requiere conocer no sólo la estructura de las proteínas y otras moléculas, sino también su dinámica (plegamiento, reconocimiento selectivo de otras moléculas o función del agua circundante). Los procesos que subyacen bajo algunas funciones biológicas son muy veloces. Los fotones que toman parte en nuestra visión o en la fotosíntesis de las plantas desencadenan procesos en una escala temporal de femtosegundos. Si bien el funcionamiento de numerosas proteínas queda descrito por escalas de tiempo muy superiores, a menudo son los movimientos atómicos o moleculares durante los primeros femtosegundos los que determinan un funcionamiento posterior correcto o defectuoso.

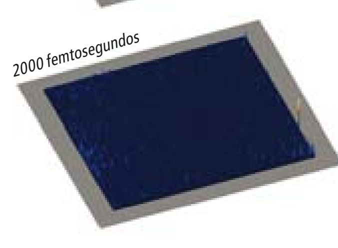
Un estudio sobre el plegamiento de proteínas ilustra el tipo de técnicas necesarias y los resultados que pueden obtenerse. Nuestro grupo investigó cuánto tiempo tardaba en doblarse un pequeño fragmento de proteína para dar lugar a una hélice cuando se calentaba el agua en la que se hallaba inmerso (las estructuras helicoidales aparecen en gran número de proteínas). Resultó que las hélices cortas se formaban unas 1000 veces más rápido (nanosegundos o menos) de lo que se creía (microsegundos).

La toma de imágenes de procesos biológicos requiere con frecuencia el empleo de otra técnica común en biología, la criomicroscopía electrónica. Una muestra inmersa en agua se introduce en etano líquido (que bulle a –89 grados Celsius). El agua se congela con suma rapidez y forma un sólido vidrioso (no cristalino) que no difracta los electrones, de manera que no estropea la formación de imágenes (como sí ocurre con los cristales de hielo ordinarios). Esta técnica nos ha permitido obtener imágenes de bacterias y de cristales de proteína.

Un proyecto para el futuro consiste en observar el plegamiento de proteínas sumergidas en este hielo vidrioso. La idea es que el pulso de inicio aumente la temperatura, derrita una pequeña gota de agua alrededor de la proteína y ésta se desdoble y vuelva a doblarse inme-





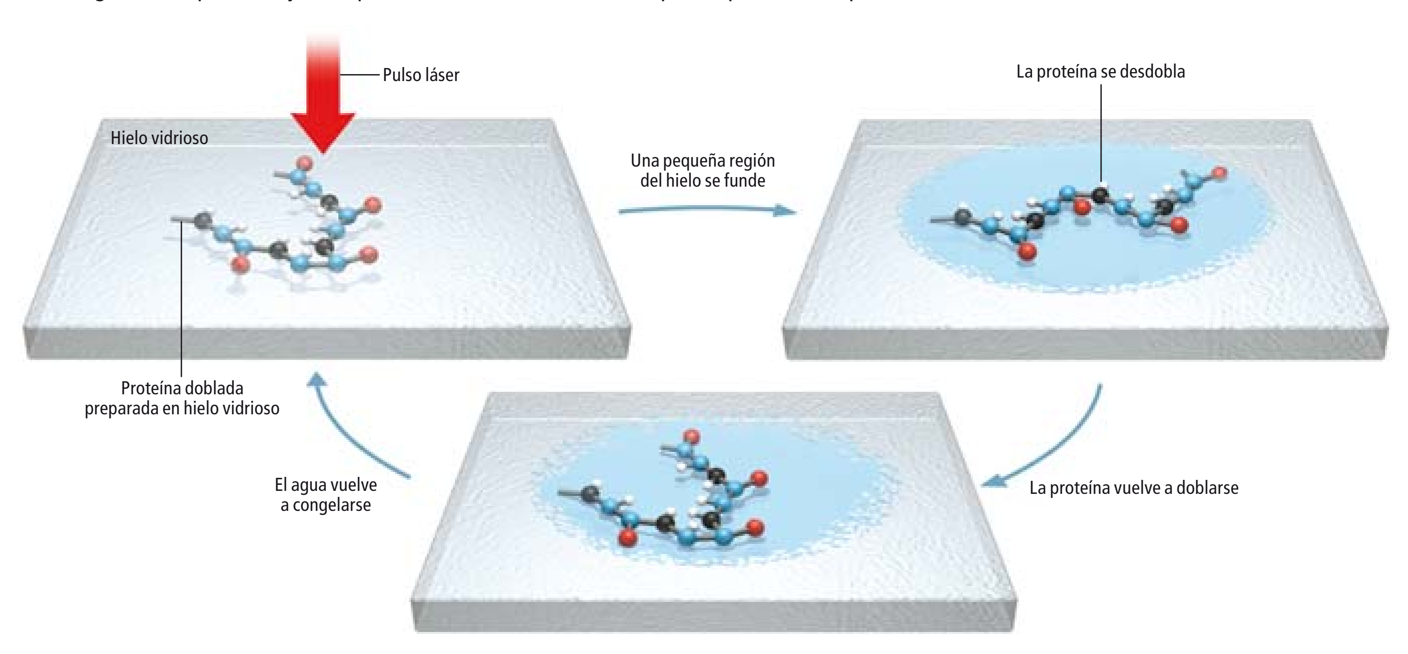


▲ Una ejemplar de *Escherichia coli* fue observada con microscopía de campo cercano inducida por fotones. Un pulso láser de femtosegundos generó un campo electromagnético de corta duración en la membrana de la célula a tiempo cero. Esta técnica genera gran contraste y una alta resolución espacial, ya que recoge sólo los electrones sonda cuya energía aumenta al atravesar el campo, (*arriba*). Los colores indican la intensidad registrada. Este método permite captar sucesos en escalas de tiempo muy breves, como demuestra la atenuación del campo tan sólo 200 femtosegundos después (*centro*). El campo desaparece a los 2000 femtosegundos (*abajo*).

CORTESIA DEL INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE CALIFORNIA

LA OBSERVACION DE RELOJES BIOLOGICOS

Un proyecto futuro consiste en la filmación de procesos biológicos, como el plegamiento de las proteínas. Para ello será necesario adaptar la técnica conocida como criomicroscopía electrónica a la microscopía ultrarrápida. Un hielo vidrioso (no cristalino) sujeta la proteína. Para cada toma, un pulso láser derrite el hielo alrededor de la muestra y la proteína se desdobla. La filmación registrará a la proteína doblándose de nuevo antes de que el agua vuelva a congelarse. Es posible sujetar la proteína al sustrato de tal modo que adopte la misma posición en cada toma.



diatamente. Después el agua se congelará de nuevo y la muestra quedará lista para otra toma. La misma técnica podría emplearse para estudiar la dinámica de los flagelos bacterianos y la de las bicapas lipídicas que forman las membranas celulares. Al igual que en el caso del grafito, la espectroscopía electrónica de pérdidas de energía debería mostrarnos los cambios de enlace. La posibilidad de obtener imágenes antes de que el sistema biológico se mueva o se desintegre nos proporcionará mejores imágenes que las que a día de hoy nos brinda la criomicroscopía.

Es posible que otras variantes de la microscopía electrónica en 4D superen la escala nanométrica (en estudios de dinámica estructural) y la escala del femtosegundo (en la observación de la distribución electrónica en la materia). Hace muy poco, nuestro grupo del Caltech desarrolló dos nuevas técnicas. En una de ellas, la microscopía electrónica ultrarrápida de haz convergente, se focaliza el pulso de electrones para sondear una región (de tamaño nanométrico) de la muestra. La otra técnica, la microscopía electrónica ultrarrápida de campo cercano, permite observar las excitaciones del plasma (plasmones) creadas en estructuras nanoscópicas por intensos pulsos láser (un fenómeno que es la base de una nueva técnica conocida como plasmónica [*véase* "Plasmónica", de Harry A. Atwater; Investigación y Ciencia, junio de 2007]). Esta técnica nos ha permitido obtener imágenes de las membranas de células bacterianas y vesículas de proteínas con una resolución de femtosegundos y nanómetros.

En los últimos años, Ferenc Krausz, de la Universidad Ludwig Maximilian de Múnich; Paul Corkum, de la Universidad de Ottawa, y otros han franqueado el régimen de los attosegundos (10^{-18} segundos) en el campo de la óptica mediante pulsos láser extraordinariamente cortos. Nuestro grupo del Caltech ha propuesto numerosos esquemas destinados a alcanzar la escala del attosegundo también en el campo de la microscopía electrónica. Con este fin estamos llevando a cabo varios experimentos en colaboración con Herman Batelaan, de la Universidad de Nebraska-Lincoln.

El microscopio electrónico es extraordinariamente poderoso y versátil. Puede operar en tres dominios: imágenes en el espacio real, patrones de difracción y espectros de energía. Se emplea en aplicaciones que van desde la física de materiales y la mineralogía hasta la nanotecnología y la biología, y permite obtener imágenes de estructuras estáticas con tremendo detalle. Al incorporar el tiempo, hemos convertido las imágenes estáticas en filmaciones que nos permiten observar la evolución de la materia en escalas que van desde el átomo hasta la célula.

GEORGE RETSECK

Bibliografía complementaria

A REVOLUTION IN ELECTRON MICROSCOPY. John M. Thomas en *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 44, n.º 35, págs. 5563-5566; 5 de septiembre, 2005.

MICROSCOPY: PHOTONS AND ELECTRONS TEAM UP. F. Javier García de Abajo en *Nature*, vol. 462, pág. 861; 17 de diciembre, 2009.

FOUR-DIMENSIONAL ELECTRON MICROSCOPY. Ahmed H. Zewail en *Science*, vol. 328, págs. 187-193; 9 de abril, 2010.

BIOLOGICAL IMAGING WITH 4D ULTRAFAST ELECTRON MICROSCOPY. David J. Flannigan, Brett Barwick y Ahmed H. Zewail en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 107, n.º 22, págs. 9933-9937; 1 de junio, 2010.

4D ELECTRON MICROSCOPY: IMAGING IN SPACE AND TIME. Ahmed H. Zewail y John M. Thomas. Imperial College Press, 2010.

Nódulos y concreciones

Amén de ser una curiosidad geológica, estas estructuras constituyen una herramienta de gran utilidad para el estudio de la evolución y la transformación de los sedimentos en rocas

Francisco Javier Torrijo Echarri y Juan Mandado Collado

CONCEPTOS BASICOS

- En las rocas, sobre todo en las sedimentarias, aparecen a menudo estructuras cuya orientación espacial indica que no son heredadas, sino que se han generado en el medio. Hallamos un ejemplo de este fenómeno en los nódulos y las concreciones.
- Se han identificado y descrito esos cuerpos concrecionarios en materiales sedimentarios y, puntualmente, en materiales ígneos y metamórficos. Se conoce muy poco sobre su distribución en el registro geológico.
- Su estudio arroja luz sobre el origen y la evolución de un sedimento. Constituye por ello una herramienta de gran utilidad en campos tan dispares como la exploración y explotación petrolíferas, la disposición de reservorios nucleares profundos, la hidrogeología y la más reciente geotermia.

En las rocas sedimentarias es muy frecuente la presencia de cuerpos irregulares o cuerpos concrecionarios (CC). Formados por precipitación o segregación de minerales, suelen denominarse nódulos o concreciones (en geología, "concreción" significa acumulación de materia alrededor de un núcleo o sobre una superficie). Desde los nódulos de sílex, tan vinculados con los albores de la humanidad, hasta las ágatas, pasando por los nódulos de yeso o de carbonato, las concreciones ferruginosas, etcétera, existe un amplio abanico de cuerpos concrecionarios.

Los nódulos y concreciones presentan una gran variedad de formas. Domina la subesférica a elipsoidal, pero hallamos también morfologías alargadas, discoidales o marcadamente irregulares. La estructura interna puede variar desde masiva a finamente bandeada, con todo tipo de términos intermedios.

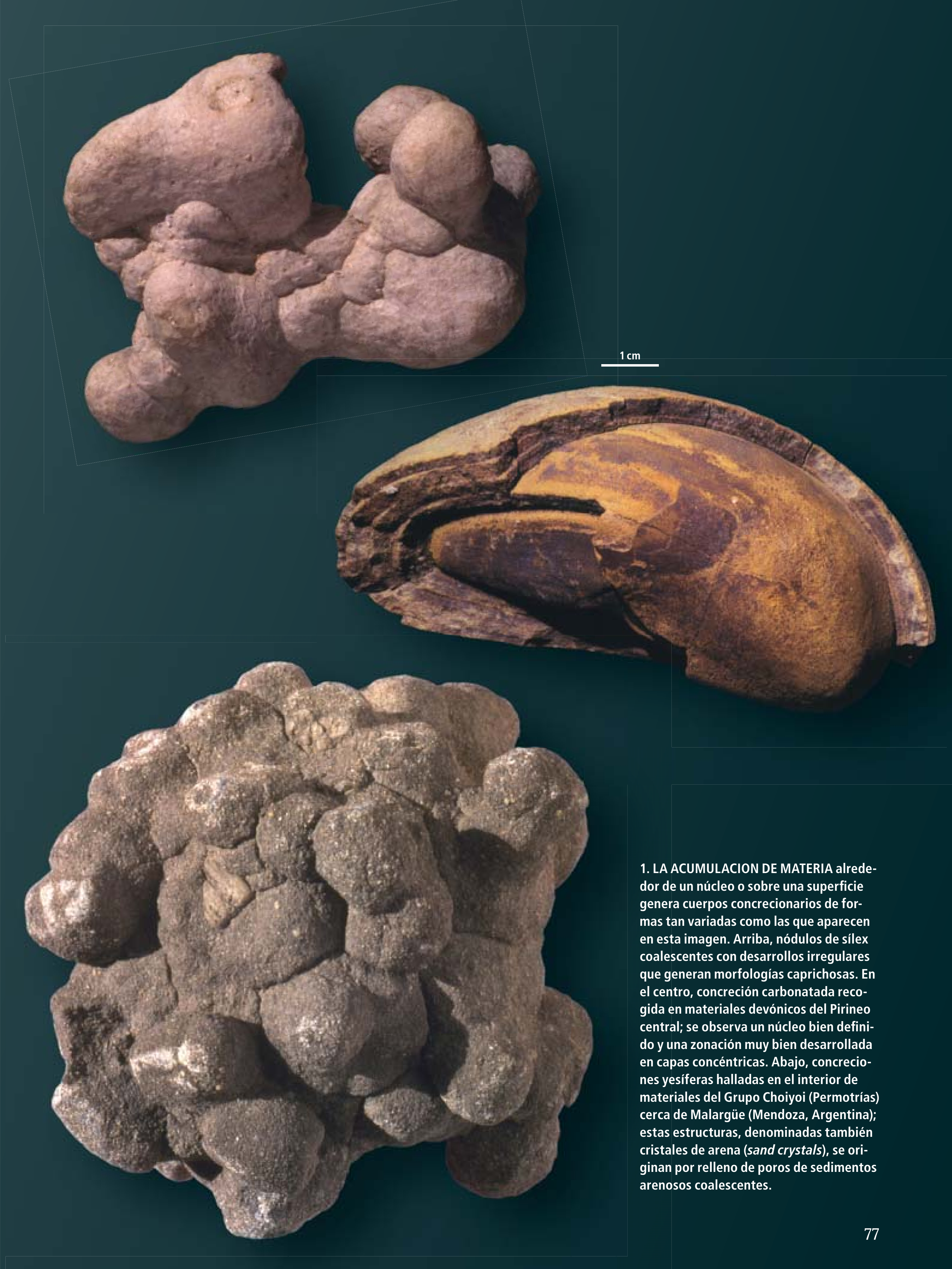
La composición de los cuerpos concrecionarios es muy diversa: pueden ser de la misma naturaleza que la roca en la que están englobados, estar constituidos por alguno de los componentes minoritarios de la misma o, en raras ocasiones, presentar una composición totalmente diferente y ajena al encajante.

La identificación, estudio y valoración de estas estructuras ha sido, y es, objeto de numerosos trabajos científicos y plantea controversias todavía no resueltas. El objetivo de la mayoría de estos trabajos es científico, por cuanto el estudio de los CC facilita la reconstrucción de la historia geológica de las rocas en que aparecen. Sin embargo, el conocimiento del mecanismo de movilización de los materiales constituyentes de estas estructuras, momento de emplazamiento y factores genéticos, resultan de suma utilidad para la reconstrucción del entorno y los condicionantes diagenéticos de una formación geológica (la diagénesis corresponde al proceso que, mediante cambios fisicoquímicos, transforma un depósito sedimentario en una roca consolidada). De ahí que encontremos también trabajos más técnicos sobre los CC, con aplicaciones en el campo de la hidrogeología, la paleoclimatología y la explotación de recursos energéticos (hidrocarburos, uranio y carbón).

El primer problema con el que nos enfrentamos es terminológico [*véase el recuadro* "Terminología"]. Los conceptos de "nódulo" y "concreción" presentan una gran confusión en cuanto a su uso y significado. Para evitar confusiones, denominaremos "concreción" a una estructura diagenética de composición similar o distinta de la de la roca encajante; con núcleo y, en general, zonaciones internas; de forma esférica, subesférica o discoidal; y formada en los poros de la roca encajante por precipitación desde soluciones intersticiales, por difusión en estado sólido a través de la misma, o por ambos.

"Nódulo" designará toda estructura diagenética de composición generalmente distinta de la de la roca encajante; sin núcleo ni zonaciones internas; de forma ovoide; y formada en los poros de la roca encajante por precipitación desde soluciones intersticiales, por difusión en estado sólido a través de la misma, o por ambos.

MUESTRA PROCEDENTE DE LA "COLECCION ORIOL RIBA"; CORTESIA DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA DE LA UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA (*SILEX*).



1. LA ACUMULACION DE MATERIA alrededor de un núcleo o sobre una superficie genera cuerpos concrecionarios de formas tan variadas como las que aparecen en esta imagen. Arriba, nódulos de sílex coalescentes con desarrollos irregulares que generan morfologías caprichosas. En el centro, concreción carbonatada recogida en materiales devónicos del Pirineo central; se observa un núcleo bien definido y una zonación muy bien desarrollada en capas concéntricas. Abajo, concreciones yesíferas halladas en el interior de materiales del Grupo Choiyoi (Permotrías) cerca de Malargüe (Mendoza, Argentina); estas estructuras, denominadas también cristales de arena (*sand crystals*), se originan por relleno de poros de sedimentos arenosos coalescentes.

TERMINOLOGIA

Como ocurre con otros campos de la geología, a la hora de establecer clasificaciones de los fenómenos estudiados, existe una ineludible tendencia a mezclar hechos descriptivos e interpretaciones genéticas. Si a ello le añadimos que, con el tiempo, estas interpretaciones sufren modificaciones, las clasificaciones se tornan cada vez más imprecisas.

Los conceptos de "nódulo" y "concreción" no son una excepción. Presentan una gran confusión en cuanto a su uso y significado. Desde antaño se ha denominado concreciones a estructuras de características muy diversas: ooides, pisoides, estromatolitos, ágatas y nódulos, entre otros. Ello explica que este término haya llegado a poseer un significado demasiado general. Además, en numerosos trabajos es frecuente el uso alterno e indiscriminado de ambos términos, que se aplican a conceptos muy variados. Por todo ello, cuando "nódulo" y "concreción" aparecen en la bibliografía, el problema es doble: ni se sabe con certeza a qué estructura se refieren ni se concreta qué procesos son exclusivos de cada uno.

Sin embargo, en todas las definiciones, los cuerpos concrecionarios comparten una característica común: presentan una composición o textura diferente a la de la roca que los aloja; ello indica que se han formado por precipitación, desde una solución acuosa, o por difusión de material en estado sólido, a través de la roca encajante. Esta constituye, por tanto, una especificación necesaria para distinguir una concreción o nódulo de un canto o cualquier otra estructura, sedimentaria o no, que posea una morfología subesférica.

Debemos tener presente que una identificación equivocada de estas estructuras puede provocar graves errores interpretativos de los ambientes sedimentarios de una formación geológica. En los niveles de conglomerados basales de la formación Bámbola (clásica en el Paleozoico de la cordillera Ibérica), por ejemplo, alineaciones de nódulos silíceos se han considerado como hiladas de cantos; ello conlleva errores de interpretación notables, puesto que los nódulos y las concreciones se forman en el interior de la roca encajante (origen diagenético), mientras que los cantos proceden de rocas preexistentes (origen sedimentario).

Vista la confusión terminológica, estableceremos las siguientes definiciones para evitar errores de identificación.

	CONCRECION	NODULO
ORIGEN	Diagenético	
COMPOSICION	Similar o distinta a la de la roca encajante	Distinta de la de la roca encajante
NUCLEO	Con núcleo	Sin núcleo
ZONACIONES	Con zonaciones internas	Sin zonaciones internas
FORMA	Esférica, subesférica o discoidal	Ovoide
FORMACION	Formado en los poros de la roca encajante por precipitación desde soluciones intersticiales, por difusión en estado sólido a través de la misma, o por ambos.	



2. **MEGANODULOS DE YESO ALABASTRINO, procedentes de nódulos previos de anhidrita, localizados en materiales margoevaporíticos de la depresión terciaria de Calatayud y explotados industrialmente en las canteras de Fuentes de Jiloca (Zaragoza).**

CORTESIA DE LOS AUTORES

Distribución en el registro geológico

Los cuerpos concrecionarios muestran una amplia dispersión espacial y temporal (desde el Paleozoico hasta hace escasamente unos pocos miles de años). Con todo, su distribución en las cuencas sedimentarias se limita a una o varias capas; se forman sólo en condiciones muy específicas. Los dominios más favorables son los del medio marino y los continentales lacustres y fluviolacustres. En el resto de los medios continentales, se describe un buen número de estructuras no diagenéticas de carácter concrecional (no consideradas auténticos CC): ooides y pisoides, estructuras nodulares edafogenéticas y espeleotemas (formadas en cavidades), entre otros. Además, también se pueden identificar otras estructuras no diagenéticas de carácter concrecional que crecen en el interior de organismos vivos. Tal es el caso de las perlas (en el interior de ostreidos) y las piedras nefríticas (en nuestro organismo).

La extensión espacial y temporal de los niveles y capas que contienen CC no puede explicarse con facilidad en la mayoría de los casos ya que, normalmente, se desconocen las particularidades del medio que inducen a la formación de estas estructuras. La presencia de restos fósiles en el interior de ciertos CC

sugiere que estos cuerpos se habrían formado por precipitación, puesto que estos restos actúan a modo de gérmenes de nucleación, siendo envueltos por el material que, posteriormente, formará los CC, de modo análogo a la formación de perlas en las ostras.

En otras ocasiones, los cuerpos concrecionarios parecen asociarse, no a una litología definida o a un tipo de facies, sino a unas condiciones fisicoquímicas que tienen lugar de forma sincrónica en varias zonas o sectores de la cuenca sedimentaria. Algunos de estos CC comienzan a formarse en la capa más superficial del sedimento, prácticamente en la interfase agua-sedimento (estas estructuras no pueden precipitar directamente desde la masa de agua, ya que en ese caso no serían diagenéticas); en otros casos, se han formado bajo cientos, o miles, de metros de sedimentos.

En cuanto a su composición, la variabilidad que presentan los CC es amplísima. Muchos de ellos están constituidos, en su mayor parte, por carbonato y se encuentran asociados con horizontes lutíticos (la lutita es una roca sedimentaria de grano muy fino compuesta de minerales de arcilla y otros materiales finamente divididos, con una estratificación muy marcada). Pero los CC también pueden presentar otras mineralogías y hospedarse en horizontes areníticos, limolíticos, carbonatados e incluso volcanoclásticos, de cualquier edad. Por tanto, no existen tampoco factores limitantes claros en este sentido.

¿Cómo estudiamos su origen?

Para describir la formación y el crecimiento de los cuerpos concrecionarios, deben considerarse numerosos factores. Uno de ellos es la forma (morfología) que presentan: irregular, esférica, esferoidal, aplanada (paralelos a la laminación o estratificación) o cilíndrica. La morfología de estas estructuras se asocia a los parámetros mecánicos y fisicoquímicos que han influido en su crecimiento. De hecho, en numerosos afloramientos se observan orientaciones preferentes de sus ejes mayores (anisotropía morfológica). Ello se asocia a dos factores, a menudo íntimamente ligados: las condiciones de depósito (las fábricas primarias de los sedimentos englobantes) y los parámetros hidráulicos (la existencia de un flujo anisótropo en el interior de los sedimentos circundantes que facilite el aporte direccional de materia y el crecimiento según las direcciones dominantes).

Otro de los factores que se incluyen en los modelos que describen la formación de los CC es la relación entre éstos y la roca en que se alojan. Este factor reviste suma importancia a la hora de discernir el mecanismo de crecimiento de estas estructuras, ya que determina el modo de emplazamiento de las mismas. Nos permite conocer si el emplazamiento ha sido por simple relleno de la porosidad del sedimento o si, por el contrario, se ha producido un desplazamiento de éste, y también si ha existido un proceso de reemplazamiento.

En ese sentido, los argumentos empleados para determinar el origen por simple relleno, crecimiento desplazante o reemplazante son sencillos. Se deducen a partir de la observación, en el campo y mediante el microscopio petrográfico, de las relaciones texturales de los componentes y de las posibles modificaciones de la fábrica primaria del sedimento. Así, la existencia en el interior de los CC de restos fósiles en buen estado de conservación, sin transformaciones provocadas por la compactación (aplastamiento, deformación o fractura de los caparazones), junto con la presencia de dichas transformaciones en la zona del sedimento no afectada por la concreción, indicaría un posible origen de relleno simple en etapas sinsedimentarias, es decir, durante la sedimentación o cuando el depósito no se hallaba todavía consolidado. Este es el caso de las concreciones de naturaleza carbonatada.

Por otra parte, la distorsión de las estructuras sedimentarias en las inmediaciones de los cuerpos concrecionarios marca en numerosos casos los posibles orígenes desplazantes de los mismos. Ello se observa en los nódulos yesíferos que se forman en las sebjas del golfo Pérsico.

Por fin, la existencia en el interior de los cuerpos concrecionarios de seudomorfos de fósiles u otros componentes primarios del se-



3. ESTRUCTURAS CONCRECIONALES, o "concreciones de color", localizadas en materiales jurásicos aflorantes en las proximidades de Letux (Zaragoza).

CORTESIA DE LOS AUTORES

Los autores

Francisco Javier Torrijo Echarri es profesor de ingeniería del terreno en la Universidad Politécnica de Valencia. Centra su investigación en la aplicación de la geología a las obras civiles y la edificación. Ha colaborado en proyectos de prospección hidrogeológica, petrolífera, diamantífera y geotécnica, y en estudios petrogenéticos de materiales paleozoicos. **Juan Mandado Collado** es profesor de petrología y geoquímica en la Universidad de Zaragoza. Sus estudios se centran en la petrología de las rocas sedimentarias y la geoquímica de procesos de baja temperatura. Ha desarrollado proyectos de prospección geoquímica, geoquímica ambiental y estudios petrogenéticos de materiales paleozoicos y terciarios.



4. FINA ZONACION CONCENTRICA en una concreción carbonatada, alojada en materiales del Devónico de la cordillera Ibérica (Tabuenca, Zaragoza). La imagen, obtenida mediante microscopio petrográfico con pocos aumentos, muestra que la zonación viene marcada por un cambio de color y por la existencia de materiales detríticos (cuarzo y minerales opacos) entre las zonaciones.

CORTESIA DE LOS AUTORES (*ambas páginas*)

dimento, de composición ajena al mismo y similar a la de los CC, constituye un claro indicio de génesis por reemplazamiento. Este proceso guarda semejanza con el que se observa en muchos nódulos de sílex englobados en rocas carbonatadas, que muestran en su interior los moldes o seudomorfos de los fósiles, ooides y otros componentes primarios del sedimento carbonatado, total o parcialmente reemplazados por sílice.

Asimismo, la relación entre la roca encajante y los CC permite también ubicarlos en un marco temporal (siempre dentro de la secuencia de procesos diagenéticos que ha sufrido el sedimento durante su transformación en roca): una laminación sedimentaria interna relicta y escasamente afectada por la compactación constituye un rasgo característico de los CC más tempranos; en cambio, una laminación igual a la del resto del sedimento es propia de CC más tardíos, generados después de la compactación.

El estudio morfológico, textural y composicional constituye, por tanto, una herramienta de trabajo básica en la evaluación del mecanismo de formación de los CC. Con todo, esta herramienta debe completarse siempre con el estudio geoquímico de los mismos, ya que el análisis de la variación de los constituyentes de los CC desde el interior de éstos hasta la roca encajante inalterada constituye una herramienta de suma utilidad para conocer el modelo de crecimiento que caracteriza la génesis de estas estructuras.

En la actualidad, los rasgos geoquímicos más utilizados para confirmar o refutar el modelo genético propuesto son: el estudio de las variaciones existentes en los CC con respecto a sus componentes mayoritarios y minoritarios; el conocimiento del marco termodinámico y fisicoquímico en que tuvo lugar su formación; los posibles cambios bruscos en la mineralogía, tamaño cristalino y hábito (aspecto macroscópico) de los minerales que los constituyen; y los posibles indicios macroscópicos y microscópicos de la estructura interna concéntrica y sus particularidades.

Dentro de este marco geoquímico, otra de las herramientas más utilizadas para discernir el origen de los CC corresponde al estudio de las relaciones isotópicas que se dan en los minerales constituyentes. Sin embargo, dichos estudios isotópicos arrojan resultados difíciles de interpretar, debido a la mezcla de aguas de distintas procedencias y a una circulación de fluidos compleja. Por todo ello, ésta constituye una de las cuestiones de mayor interés para la investigación actual.

Desvelar el mecanismo de crecimiento de los cuerpos concrecionarios sigue siendo uno de los mayores retos para la geología. De los más sencillos a los más complejos, se han ido proponiendo diferentes modelos. Sin embargo, éstos explican sólo las peculiaridades de algunos tipos de CC. No existe una única teoría general aplicable a todo tipo de cuerpos concrecionarios.

Crecimiento por relleno de poros

El modelo más sencillo es el que plantea el crecimiento de los cuerpos concrecionarios por relleno de los poros del sedimento. A partir de un núcleo que favorece el depósito de los componentes disueltos en las aguas intersticiales, se produce la precipitación química de la fase o fases minerales que constituyen los CC. Iniciada la precipitación, se establece un gradiente de concentración entre la zona mineralizada y su entorno, de tal modo que se mantiene un flujo constante de material, bien por simple gradiente químico o favorecido por los flujos direccionales existentes en el sistema.

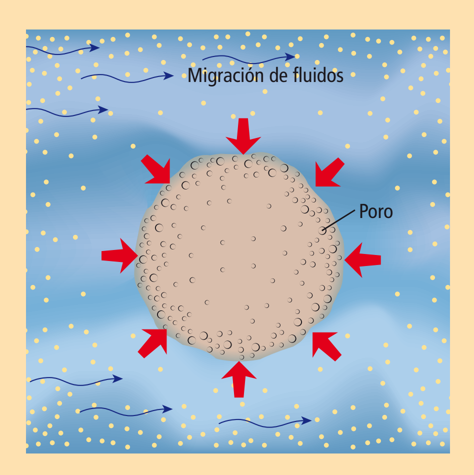
Se trata de un proceso lento. Debería llevar asociado, por una parte, la evolución simultánea de la porosidad del sedimento (como consecuencia del peso creciente de los materiales que se van acumulando); y por otra, la modificación de su composición por parte de las soluciones intersticiales (debido a la precipitación del material de los CC y por reacción con los materiales solubles del sedimento).

En suma, un crecimiento por relleno de poros se caracterizará por una variación en la proporción de material cementante, desde el núcleo a la periferia de los CC, resultado de la progresiva disminución de los poros del sedimento conforme progresa el enterramiento,

¿COMO SE FORMAN LOS CUERPOS CONCRECIONARIOS?

La formación de un cuerpo concrecionario (CC) necesita un núcleo o germen de crecimiento, un entorno favorable para la precipitación, una fuente de agente cementante y un mecanismo de aporte de éste a la zona de crecimiento. Uno de los mayores retos de la geología consiste en desentrañar el mecanismo que subyace al crecimiento. Se han propuesto varios modelos, pero todos son parciales (explican sólo las peculiaridades de un tipo de CC). No existe todavía una teoría general.

CRECIMIENTO POR RELLENO DE POROS



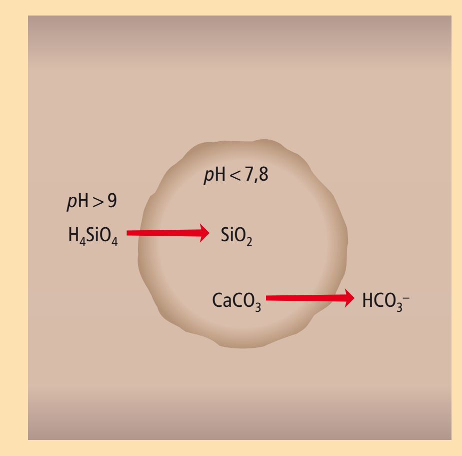
Los minerales disueltos en las aguas intersticiales precipitan sobre el núcleo de crecimiento. El gradiente de concentración entre la zona mineralizada y el entorno garantiza un flujo constante de material (*rojo*). Se trata de un proceso lento. La proporción de material cementante varía desde el núcleo a la periferia del CC, debido a la disminución de los poros conforme progresa el enterramiento.

CRECIMIENTO DESPLAZANTE



Una salmuera concentrada precipita en los poros de un sedimento poroso y no cementado. Debido a la presión de cristalización, los minerales que cristalizan desplazan el material encajante y generan cuerpos subesféricos. Este tipo de crecimiento se produce sólo en condiciones de enterramiento somero.

CRECIMIENTO REEMPLAZANTE



Se produce un reemplazamiento de cementos tempranos mediante reacciones químicas entre la solución madre y la roca encajante. Ocurre sobre todo cuando entran en juego sílice (SiO_2) y carbonato ($CaCO_3$), ya que ambos compuestos se reemplazan el uno al otro según la acidez: un medio con *p*H superior a 9 transporta carbonato y disuelve la sílice; en un medio con *p*H inferior a 7,8 se disuelve el carbonato y precipita la sílice.

Nódulos de caolinita, formados por crecimiento de poros, emplazados entre lutitas y limolitas del Devónico superior de la cordillera Ibérica (Tabuenca, Zaragoza).

Nódulos de yeso reemplazado parcialmente por sílex, procedente de materiales miocenos de la cuenca del Ebro (Ablitas, Navarra).

Nódulos de yeso intercalados entre niveles margoevaporíticos del Terciario del valle del Ebro (Fuentes de Ebro, Zaragoza). La deformación de las capas superiores e inferiores indica un crecimiento desplazante.

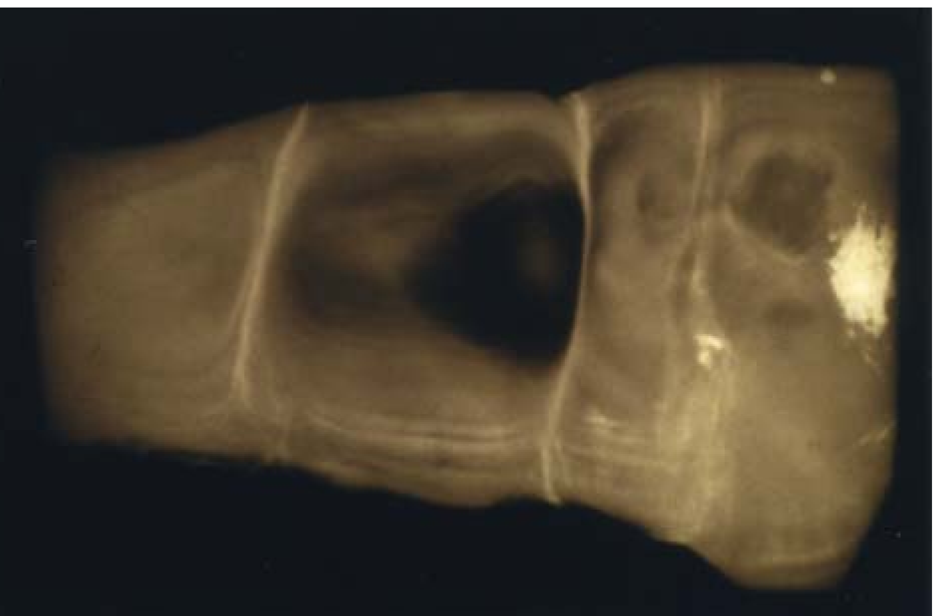
5. CONCRECIONES CARBONATADAS COALESCENTES. Sección pulida (*izquierda*) y radiografía (*derecha*). Las radiografías permiten observar subestructuras no apreciables a simple vista. Ello facilita el estudio de estas estructuras y favorece el desarrollo de modelos genéticos. Muestra localizada en materiales paleozoicos de la cordillera Ibérica (Fuendejalón, Zaragoza).

y por una pauta de variación composicional, del centro al borde.

Un aspecto complementario para la comprensión del crecimiento de los CC es la procedencia del material constituyente. En el modelo de crecimiento por relleno de poros, hay que situar la fuente en la solución intersticial. Sin embargo, ciertos CC parecen alimentarse de la zona circundante o del propio centro.

Por último, debe considerarse la naturaleza del mecanismo de precipitación del agente cementante. Los análisis mineralógicos y texturales mediante fluorescencia azul y ultravioleta, y petrografía de alta resolución permiten observar, en algunas concreciones, zonaciones internas de pequeña escala (10 micrometros o menos) que sólo son posibles mediante procesos de cementación irregular.





CORTESIA DE LOS AUTORES

Crecimiento desplazante

Un segundo modelo de formación de los cuerpos concrecionarios se basa en el crecimiento desplazante (el nódulo o concreción desplaza el material encajante). Ocurre cuando el crecimiento se debe a la precipitación, a partir de una salmuera concentrada, en los poros de un sedimento poroso y no cementado, de tal modo que los minerales que cristalizan desplazan el sedimento y generan cuerpos subesféricos. La fuerza que ejercen los CC para desplazar el sedimento es consecuencia de la presión de cristalización. Esta presión debe ser, lógicamente, superior a las fuerzas cohesivas que operan entre las partículas y a la carga litostática que sufren éstas. Por tanto, este tipo de crecimiento se produce sólo en condiciones de enterramiento somero.

Los ejemplos más característicos de este modelo de crecimiento corresponden a los nódulos de yeso lenticular o de anhidrita prismática que se forman en medios evaporíticos de sebja como los hallados en el golfo Pérsico, mar Muerto o los chotts tunecinos, o los que se formaron en ambientes similares durante el Terciario en la cuenca del valle del Ebro o en la cuenca de Calatayud, donde alcanzan dimensiones de escala métrica.

El mecanismo de formación de esos nódulos es sencillo. En los medios de aridez extrema, las aguas superficiales, así como las subterráneas, presentan una salinidad muy elevada. En los períodos áridos, el agua puede ascender, mediante bombeo por evaporación, del nivel freático a la superficie, de modo que se producen en la zona capilar sobresaturaciones aún mayores, alcanzándose el punto de precipitación de los sulfatos cálcicos. Los cristales que se forman en esas condiciones suelen ser de yeso lenticular (rosas del desierto); y si el proceso se mantiene y se estabiliza durante lapsos de tiempo prolongado, llegan a formarse nódulos e incluso niveles continuos de yeso de estas características. La forma lenticular de los cristales de yeso impide que la porosidad se cierre en el punto de precipitación y favorece el desarrollo de nódulos de gran tamaño.

Crecimiento reemplazante

El tercer, y último, mecanismo de crecimiento de los cuerpos concrecionarios es el reemplazante. Según éste, los CC se emplazan por reacciones químicas entre la solución madre y la roca encajante. Su crecimiento se produce por reemplazamiento de cementos tempranos o por corrosión y reemplazamiento del armazón de granos de la roca encajante.



WIKIMEDIA COMMONS

6. BANDEADO EN AGATAS. Las ágatas, estructuras de composición silícea, presentan un bandeado concéntrico muy vistoso de tipo asociado y repetitivo. Su génesis se explica mediante modelos de autoorganización geoquímica.

Se observa sobre todo cuando entran en juego sílice y carbonato, ya que ambos compuestos pueden reemplazarse en respuesta a pequeñas variaciones del *p*H de las aguas intersticiales. El carbonato se disuelve en medios con *p*H inferior a 7,8 y precipita para valores superiores; la sílice, en cambio, muestra una solubilidad baja para *p*H inferiores a 9 y muy elevada para valores superiores. Así, un medio muy básico (*p*H superior a 9) presenta carbonato y transporta sílice en solución; pero si el *p*H desciende bruscamente por debajo de 7,8, el carbonato se disuelve y la sílice precipita, con lo que se produce el reemplazamiento del carbonato por la sílice.

La persistencia de un proceso de ese tipo en un medio con una fuente de sílice produciría el desarrollo de un nódulo o concreción silexítico en medio de la masa de carbonato. En este caso, se utilizan las condiciones locales de variación del *p*H para justificar la distribución irregular de los CC en el sedimento, siendo la materia orgánica la responsable principal de las oscilaciones del *p*H, ya que durante su descomposición genera microambientes ácidos.

A modo de síntesis, la formación de un cuerpo concrecionario necesita un núcleo o germen de crecimiento, un entorno favorable para la precipitación, una fuente de agente cementante y un mecanismo de aporte de éste a la zona de crecimiento. La variabilidad espacial y temporal de estos cuatro factores básicos determinará la distribución y los aspectos morfológicos, estructurales y temporales de los cuerpos concrecionarios.

Autoorganización geoquímica

En la actualidad, existe una corriente de investigación que intenta dar una explicación global a la génesis y el crecimiento de los cuerpos concrecionarios mediante modelos de autoorganización geoquímica. La autoorganización describe el proceso por el cual un sistema que no se encuentra en equilibrio adopta por sí mismo, mediante su propia dinámica y evolución hacia ese equilibrio, estructuras espaciales repetidas.

Hallamos en nuestro entorno numerosos sistemas que responden a procesos de autoorganización: ondulaciones en la arena de la playa y en desiertos (*ripples*), campos de dunas, meandros en los cursos fluviales, nubes y células de convección de fluidos, entre otros.

Centrándonos en la autoorganización geoquímica aplicada a la génesis de los cuerpos concrecionarios, destacan por su belleza y relativa simplicidad las ágatas. Estas estructuras, de composición silícea (variedad de calcedonia), presentan unas texturas de tipo repetitivo y asociado, que resultan en un bandeado concéntrico, de colores diversos, que les confiere un atractivo singular en joyería. Otras estructuras que responden a este modelo de crecimiento son los cementos en bandas, pedernales (*cherts*) y hierros bandeados precámbricos, estilolitos en rocas sedimentarias monominerálicas, las bandas minerales características de las menas de tipo valle del Mississippi y la esquistosidad y foliación típica de las rocas metamórficas.

Bibliografía complementaria

CONCRETION MORPHOLOGY, CLASSIFICATION AND GENESIS. J. Sellés-Martínez, en *Earth-Science Reviews*, vol. 41, págs. 177-210; 1996.

NODULOS Y CONCRECIONES. MODELOS GENETICOS. Francisco J. Torrijo, Juan Mandado, R. B. Joven y F. J. Sanz, en *Revista de la Academia de Ciencias Exactas, Físicas, Químicas y Naturales de Zaragoza*, vol. 52, págs. 159-169; 1997.

MODELIZACION GENETICA DE NODULOS Y CONCRECIONES. PROPUESTA DE CLASIFICACION. Francisco J. Torrijo, Juan Mandado y M. E. Bona, en *Estudios Geológicos*, vol. 61, págs. 9-23; 2005.

OVERVIEW OF IRON OXIDE CONCRETIONS AND IMPLICATIONS FOR MARS: CURRENT KNOWLEDGE AND GAPS. M. A. Chan, S. L. Potter y B. B. Bowen, en *40th Lunar and Planetary Science Conference*, marzo de 2009.

TUBULAR CONCRETIONS IN NEW ZEALAND PETROLIFEROUS BASINS: LIPID BIOMARKER EVIDENCE FOR MINERALISATION AROUND PROPOSED MIOCENE HYDROCARBON SEEP CONDUITS. M. J. Pearson, E. Grosjean, C. S. Nelson, S. L. Nyman y G. A. Logan, en *Journal of Petroleum Geology*, vol. 33, págs. 205-219; 2010.

Microchips piratas

Por si no bastara con los virus informáticos, los circuitos integrados de los equipos electrónicos podrían sufrir ataques antes de abandonar la fábrica. Las consecuencias serían nefastas

JOHN VILLASENOR

CONCEPTOS BASICOS

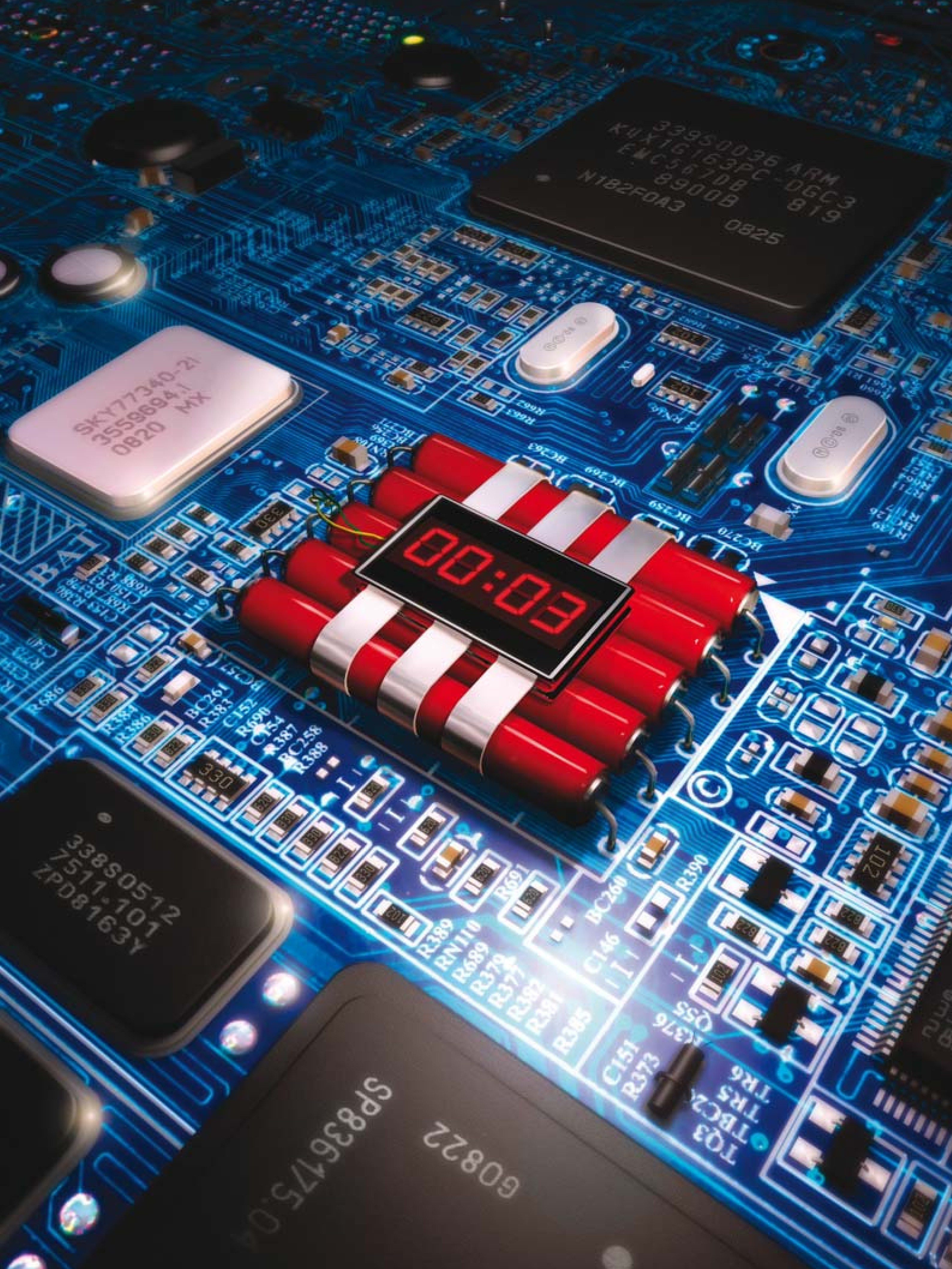
- La complejidad de los circuitos integrados aumenta cada día. Ello implica una vulnerabilidad cada vez mayor a agresiones externas.
- Es habitual que un microchip incorpore diseños de numerosas procedencias. Algunos de esos diseños podrían ser objeto de un ataque "troyano" que se manifieste mucho tiempo después de que el circuito haya abandonado la fábrica.
- Ciertas medidas sencillas supondrían grandes avances en la protección del equipo físico.

Imaginemos por un momento la siguiente situación: nuestro teléfono móvil se bloquea de repente, su teclado no funciona y no resulta posible recibir ni enviar llamadas o mensajes de texto. El aparato tampoco se apaga. Al extraer la batería y reponerla otra vez, el teléfono vuelve a bloquearse. Parece evidente que no se trata de un fallo ordinario. Es más, al cabo de unas horas, nos enteramos de que millones de personas han sufrido el mismo problema.

Semejante situación ejemplifica la manera en que podría manifestarse un ataque masivo a los circuitos integrados de alguno de los dispositivos que nos prestan servicio cotidiano. Los microchips actuales han alcanzado tal grado de complejidad que, a día de hoy, no existe ningún equipo de ingenieros que comprenda el funcionamiento de todos los componentes de un microprocesador. En general, un circuito integrado es diseñado por varios equipos repartidos por todo el mundo. Ello implica que, en caso de un ataque como el descrito arriba, una revisión exhaustiva sería del todo inviable. Además, un virus instalado en el código de un microprocesador pasaría inadvertido hasta que algún desencadenante lo activase, como podrían ser una fecha y momento determinados. Al igual que un troyano, su ataque sólo tendría lugar una vez instalado en el interior de nuestros dispositivos.

Debido a su naturaleza física, una agresión al equipo electrónico provocaría mucho más daño que cualquier virus u otro programa malicioso. Si bien estos últimos logran propagarse de una máquina a otra, también pueden borrarse de cualquier sistema infectado. En cambio, la única manera conocida hasta la fecha de subsanar un ataque a los microprocesadores consiste en reemplazar la circuitería.

KENN BROWN *Mondolithic Studios*


339S0036 ARM
K4X1G163PC-DGC3
EMC56708
N182F0A3 8900B 819
0825
SKY77340-21
3559694.1
0820 MX
00:03
338S0512
7511-101
ZPD8163Y
G0822

La dificultad de reparar un circuito infectado mantiene en vilo a los expertos en seguridad informática. Todo equipo que utilice microprocesadores —casi cualquier equipo electrónico— resulta vulnerable. Los circuitos integrados son la base de nuestros sistemas de comunicación y de la red mundial de suministro eléctrico. Regulan desde los alerones de las aeronaves modernas y el sistema de frenos antibloqueo de los automóviles hasta el acceso a una cámara acorazada, los cajeros automáticos o el control del mercado bursátil. Constituyen la base de casi todos los sistemas empleados por las fuerzas armadas. Un ataque bien planeado podría detener las transacciones comerciales o abortar operaciones del ejército o del gobierno.

Dado que un ataque de tipo troyano puede permanecer oculto durante años antes de manifestarse, es posible que a día de hoy ya haya equipos electrónicos infectados. Pese a que aún no se ha detectado ningún ataque masivo, en el futuro tal contingencia se antoja inevitable.

Como ponen de manifiesto los virus informáticos habituales, el perjuicio provocado por un reducido grupo de piratas informáticos puede resultar enorme. Es por ello que, en lugar de preguntarnos si tales ataques ocurrirán o no algún día, parece mejor invertir esfuerzos en pronosticar la forma que adoptarán y evaluar sus consecuencias. Y, por supuesto, hallar una manera de detectar y detener tales ataques.

Bloque a bloque

Un microprocesador es un circuito electrónico grabado en una oblea de material semiconductor, normalmente silicio. Hoy en día su miniaturización es extrema: en muy pocos centímetros cuadrados se alojan miles de millones de transistores. Es precisamente esa enorme complejidad lo que los hace vulnerables a ataques de tipo troyano.

Un microchip se halla dividido en unidades funcionales denominadas bloques, cada una de las cuales acomete tareas distintas. En el procesador de un teléfono móvil, un bloque puede almacenar la memoria de un vídeo captado por la cámara, otro comprime ese vídeo en un archivo MPEG y un tercero lo transforma en un formato apto para ser transmitido por la antena. Los datos se trasladan de un bloque a otro a través del bus del sistema: una especie de autopista que interconecta las diferentes partes del microprocesador.

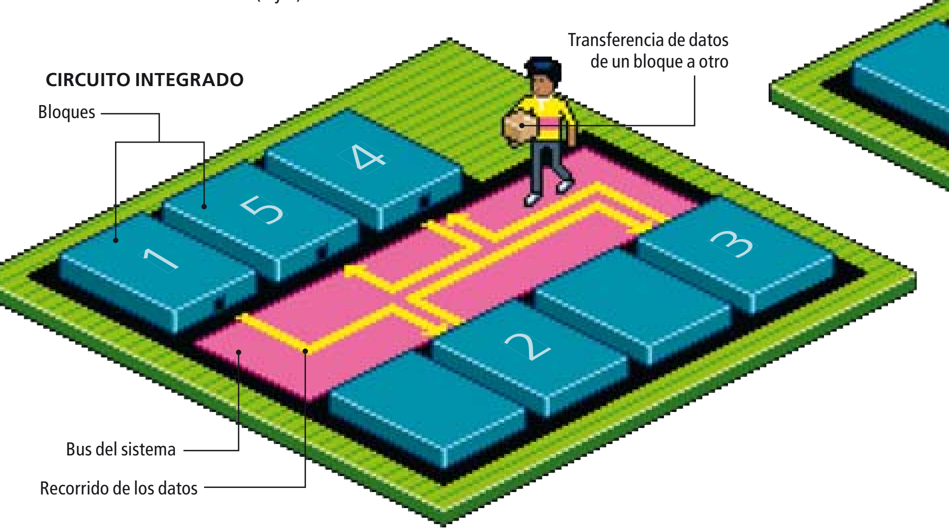
Cuando una compañía acomete el diseño de un microchip, lo primero que hace es delimitar sus bloques funcionales. Algunos de ellos se proyectarán en la propia empresa, pero otros provendrán de compañías ajenas y especializadas en determinadas funciones, como la recepción de datos por antena.

Los bloques diseñados por terceros nunca llegan en soportes de silicio. Dado que el objetivo consiste en integrar en una misma unidad física todos los bloques funcionales, los diseñados por otra empresa llegan en forma de archivos informáticos que describen todos los detalles del proceso de grabado en silicio. Tales archivos pueden contener miles de líneas, lo que en la práctica imposibilita que alguien lo lea y comprenda todas sus operaciones. Por regla general, el proveedor facilita un código informático que permite al diseñador del chip estudiar el funcionamiento del bloque ante diversas situaciones. Antes de imprimir circuito alguno, la empresa combina todos los bloques en una simulación informática para cerciorarse de que el microprocesador funciona según lo previsto. Sólo cuando el modelo haya superado todas las pruebas se iniciará el

UN PROBLEMA DE SEGURIDAD MUNDIAL

Un mismo procesador incorpora circuitos diseñados en diferentes partes del mundo por cientos de personas pertenecientes a distintas empresas. La globalización del diseño acelera el desarrollo de nuevos productos y reduce su coste, pero también entraña riesgos: la complejidad del proceso hace que la detección de alteraciones maliciosas de un circuito sea casi imposible.

▼ **INTERIOR DEL CIRCUITO INTEGRADO:** Un chip moderno se compone de diversos bloques funcionales, cada uno de los cuales realiza una tarea o grupo de tareas determinado. Los datos se desplazan de un bloque a otro a través del bus del sistema; otro bloque, el controlador del bus, regula el flujo de datos. En un teléfono móvil, los datos se transfieren desde la memoria (*1*) hacia el bloque de cómputo (*2*); de allí pasan a otro que codifica y descodifica la información (*3*) y después a los bloques que intercambian información con el exterior (*4* y *5*).



EL DISEÑO DE CIRCUITOS, EN CIFRAS

1550
Número estimado de compañías en todo el mundo dedicadas al diseño de circuitos integrados: unas 700 en Norteamérica, 600 en Asia y 250 en Europa, Oriente Medio y Africa.

2500
Número aproximado de nuevos microchips diseñados cada año.

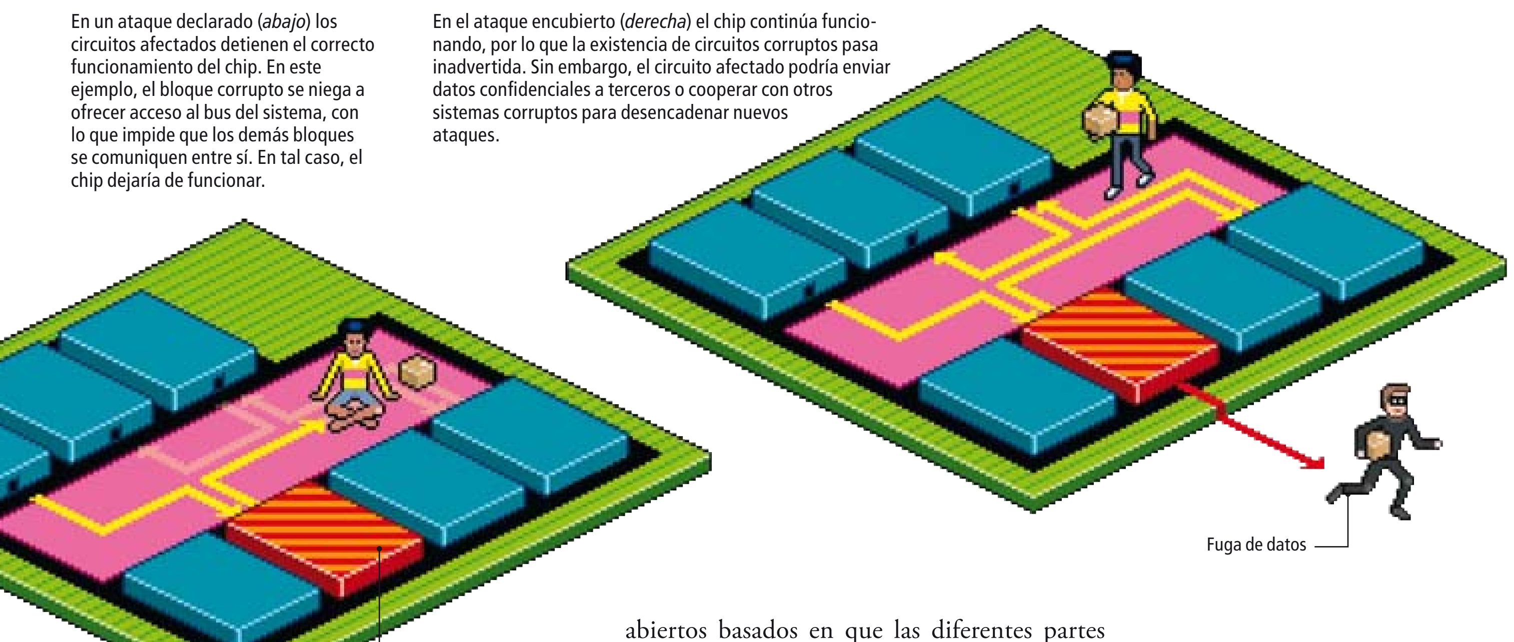
185.000 millones de euros
Ingresos mundiales por ventas de semiconductores en 2009.

QUICKHONEY

▼ **CUANDO ALGO FALLA:** Un chip afectado por un ataque troyano funciona con normalidad hasta que una señal activa el circuito corrupto. El detonante del ataque puede ser de varios tipos, desde una cierta fecha y hora hasta una señal procedente del exterior. Existen dos tipos de ataque troyano: declarado y encubierto.

En un ataque declarado (*abajo*) los circuitos afectados detienen el correcto funcionamiento del chip. En este ejemplo, el bloque corrupto se niega a ofrecer acceso al bus del sistema, con lo que impide que los demás bloques se comuniquen entre sí. En tal caso, el chip dejaría de funcionar.

En el ataque encubierto (*derecha*) el chip continúa funcionando, por lo que la existencia de circuitos corruptos pasa inadvertida. Sin embargo, el circuito afectado podría enviar datos confidenciales a terceros o cooperar con otros sistemas corruptos para desencadenar nuevos ataques.



lento y costoso proceso de fabricación de los circuitos físicos.

En ese punto reside su vulnerabilidad: dado que un circuito corrupto requiere un estímulo para activarse, los fabricantes de microchips tendrían que simular en sus modelos un sinfín de desencadenantes para asegurarse de que el producto final carece de fallos. Dada la vasta cantidad de estímulos posibles, semejante tarea resulta impracticable. Además de un desencadenante interno, como el ejemplo de la fecha descrito para el teléfono móvil, los agresores podrían recurrir a agentes externos: entre otros, la recepción de un mensaje de texto o un correo electrónico con una determinada secuencia de caracteres. Aunque los fabricantes refinan sus pruebas al máximo, sus controles sólo logran abarcar una minúscula fracción de todos los desencadenantes posibles.

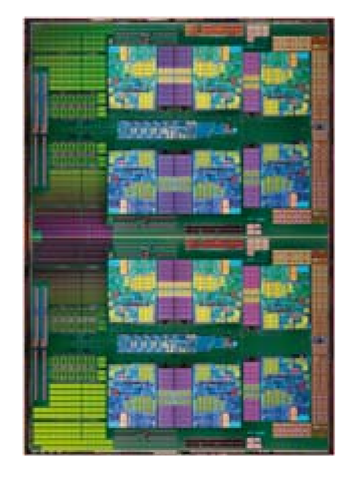
Una cuestión de confianza

En los primeros tiempos del diseño de circuitos integrados no había razones para temer intrusiones maliciosas. Los diseños se realizaban íntegramente en el seno de una empresa, por parte de grupos pequeños que dirigían su esfuerzo a un objetivo común y compartían el interés por el éxito del circuito. Esta seguridad permitía a los diseñadores establecer protocolos abiertos basados en que las diferentes partes del chip funcionarían según las expectativas. La historia se asemeja a las decisiones tomadas en los primeros días de Internet, constituida como plataforma abierta por una pequeña comunidad académica bajo la suposición de un comportamiento correcto por parte de todos los usuarios. Algo que, como sabemos, no resistió al desarrollo posterior.

Hoy en día el diseño de un solo circuito integrado puede involucrar a cientos e incluso miles de personas repartidas por todo el mundo. A lo largo del proceso, las partes del diseño se almacenan en numerosas plataformas físicas y se intercambian entre múltiples entidades. Este es el caso de un fabricante estadounidense que combina diseños propios con otros adquiridos a firmas de Europa e India, para después acabar produciendo el chip en una fábrica china. En tiempos recientes se han establecido redes mundiales de este género, algo que disminuye sobremanera los costes al tiempo que aumenta la eficiencia. Sin embargo, la seguridad se ve mucho más afectada que en los tiempos en los que todo el proceso se llevaba a cabo en un mismo lugar. Dada la gran cantidad de participantes y la complejidad del proceso, la posibilidad de que un intruso acceda al diseño del circuito se torna mucho mayor.

También existe el riesgo de que alguien provisto de acceso interno corrompa el diseño. A pesar de la honestidad de la inmensa mayoría de los ingenieros, no pueden descartarse

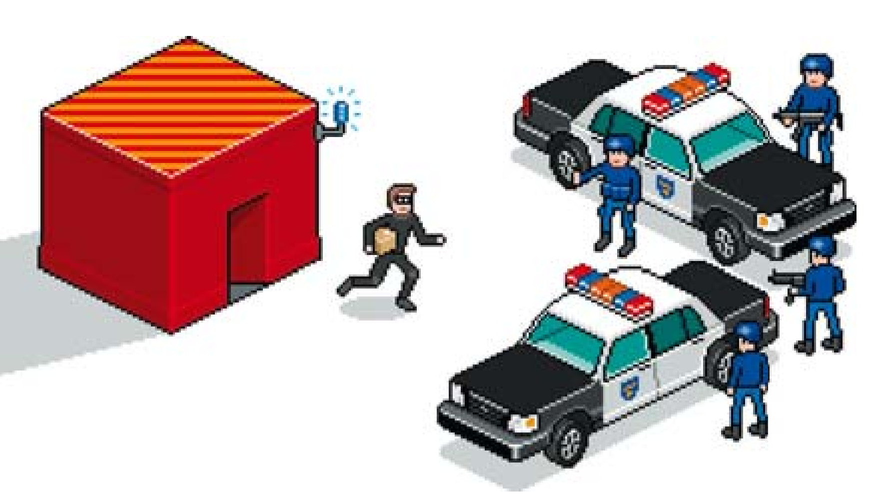
UNA MENTE MODERNA: El procesador AMD Opteron 6100, reproducido a tamaño real, consta de dos circuitos integrados que contienen más de 1800 millones de transistores. Los distintos colores se corresponden con diferentes bloques funcionales.



CORTESIA DE AMD

RESPUESTA A UN ATAQUE

Un circuito integrado protegido es aquel que incorpora circuitería adicional con el objetivo de supervisar el funcionamiento interno del chip. Al detectar un comportamiento hostil, se activan mecanismos que identifican el origen del ataque y lo contrarrestan. A continuación se enumeran algunas estrategias en desarrollo.



ACCION PROTECTORA	EFECTO	ASI FUNCIONA
Control de acceso a la memoria	Evita el acceso de un bloque corrupto a zonas de memoria no autorizadas. Impediría el espionaje o la modificación de datos.	El control garantiza que los bloques sólo accedan a zonas de memoria autorizadas y avisa de cualquier tentativa de acceso no permitido.
Protección del bus del sistema	Previene un control malicioso del bus del sistema, lo que provocaría un paro total o un funcionamiento muy lento.	El bus analiza las estadísticas de acceso de los distintos bloques funcionales y marca los comportamientos anormales.
Monitorización de entradas y salidas	Imposibilita el espionaje encubierto (cuando el circuito intenta transmitir datos a un dispositivo ajeno).	El circuito analiza el flujo de datos que entran y salen, lo compara con el previsto y advierte de cualquier anomalía.
Revisión de bloques *in situ*	Defiende contra un ataque troyano que intente dañar un bloque anteriormente "sano".	Se revisan periódicamente los bloques para comprobar si continúan funcionando como deben.
Adición de circuitos lógicos programables	Permite poner un bloque dañado en cuarentena y suplir su función.	Los circuitos extra se configuran para sustituir al bloque funcional en cuarentena. Es probable que conlleve una disminución en la velocidad de operación.
Alerta de ataques	Avisa a otros circuitos para que se protejan contra futuros ataques.	El circuito atacado emprende acciones para contrarrestar el ataque y avisa a otros dispositivos que contengan el mismo circuito.

QUICKHONEY

acciones maliciosas desde el interior de un proceso con tantos participantes. Por aisladas que éstas fuesen, la magnitud del problema sería considerable.

En un caso ideal los presuntos atacantes nunca conseguirían acceder al diseño ni a la fabricación de un circuito integrado. Esta ha sido la estrategia adoptada por la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada para la Defensa (DARPA). DARPA elabora procedimientos que garanticen que todas las fases del diseño se encomienden a empresas y personas de reconocida confianza y que trabajen en entornos protegidos. En la práctica, sin embargo, por eficientes que se muestren tales medidas, nunca serán perfectas. Es por ello que los fabricantes también deben considerar soluciones alternativas: en particular, construir circuitos que identifiquen y respondan a los ataques.

Proteger los circuitos

Un "circuito integrado protegido" es aquel dotado de un sistema para detectar agresiones y responder a ellas. Tales microchips cuentan con una moderada proporción de circuitos extra diseñados para monitorizar su funcionamiento y detectar indicios de un ataque al soporte físico. En caso de un comportamiento anómalo, el circuito de protección ha de identificar el tipo de ataque y ejercer acciones encaminadas a minimizar el daño.

En el ejemplo del teléfono móvil bloqueado, el fallo podría tener origen en un solo bloque. Dicho bloque interactúa con todos los demás a través del bus del sistema. Este, a su vez, cuenta con un controlador del bus: algo así como un guardia de tráfico que decide qué información puede circular por el bus y en qué momento. La analogía, sin embargo, no es perfecta. En general, la autoridad del controlador del bus no iguala a la del agente de tráfico: aunque el controlador puede autorizar a un bloque para que comience a transmitir información, el bloque puede retener el acceso todo el tiempo que desee. Tal comportamiento no es sino una reliquia de tiempos pasados, cuando se daba por supuesto que los bloques siempre funcionarían correctamente. He aquí la causa del problema.

En condiciones normales un bloque retiene el acceso al bus del sistema sólo durante el tiempo necesario antes de liberarlo para que lo utilicen otros bloques. Pero si un bloque mantuviera el control del bus indefinidamente, no podrían circular nuevos datos por el circuito y el sistema se bloquearía.

Por el contrario, un circuito integrado protegido realiza verificaciones constantes para cerciorarse de que no se han alterado las co-

municaciones entre los bloques. Al descubrir que un bloque monopoliza el acceso al bus, un circuito protegido responde poniendo en cuarentena el bloque sospechoso y, después, programa su dotación extra de circuitos para suplir las funciones eliminadas al haber aislado el bloque defectuoso. Es posible que la rapidez del sistema se resienta, pero al menos el circuito seguirá operativo.

La manifestación de un ataque como el que acabamos de describir resultaría evidente ("ataque declarado"). Pero quizá la amenaza más grave no provenga de un simple bloqueo del sistema. Bajo un "ataque encubierto" un dispositivo infectado parecería funcionar de manera correcta aunque operara con fines maliciosos. En el caso de un teléfono móvil, un ataque semejante podría consistir en la transmisión secreta a terceros de una copia de todos los mensajes de texto. El usuario no detectaría irregularidad alguna y el ataque podría mantenerse indefinidamente.

Un circuito integrado protegido ofrecería una defensa muy eficaz contra tales ataques: bastaría con monitorizar la cantidad y el tipo de datos que entran y salen del circuito y someterlos a una comparación estadística con el flujo de datos esperado. Cualquier anomalía sería señalada como posible fuga de información, el chip alertaría al usuario o bien detendría el tráfico.

Además de tomar medidas para contrarrestar los efectos de un ataque troyano en el propio equipo, un circuito protegido podría informar a otros aparatos de la agresión, lo cual les permitiría adoptar precauciones para evitarla o contrarrestarla. Tales notificaciones no serían tan inverosímiles como pudiera parecer, ya que hoy en día casi todos los sistemas disponen de alguna conexión con dispositivos ajenos. Así, si un circuito lograse identificar el mensaje desencadenante de un ataque, podría advertir a otros circuitos para que bloqueen dicho mensaje.

Es evidente que la eficacia de todas las medidas descritas depende de que las partes del circuito encargadas de la protección del conjunto se hallen, a su vez, protegidas. Esto puede parecer un argumento circular ("la única manera de proteger un circuito es proteger ese circuito"). La diferencia estriba en que los elementos del circuito protector representan sólo una pequeña parte del diseño completo, por lo que los mismos pueden ser diseñados por un único equipo, lo que garantizaría un acceso exclusivo a personas de confianza.

Cuestiones futuras

Gracias al esfuerzo de gobiernos, investigadores académicos y del sector empresarial se han logrado enormes progresos en la seguridad de Internet. No es posible afirmar lo mismo acerca del nivel de seguridad en los microchips, similar al que mostraba Internet hace quince años. Si bien poco a poco se reconoce la importancia del asunto, las estrategias defensivas no se han desarrollado por completo ni mucho menos llevado a la práctica.

Abordar una protección total contra los ataques troyanos a la circuitería requiere actuar en varios ámbitos. Un buen comienzo lo constituyen los protocolos que aseguran que los circuitos vulnerables nunca salgan al exterior, como establece el programa de la DARPA. Sin embargo, lo más importante es que empecemos a aplicar medidas de protección al diseño como las que hemos expuesto aquí, aptas para repeler los ataques. Por supuesto, las mismas no serán gratuitas: como sucede en cualquier sector, la seguridad de un circuito integrado exigirá esfuerzo, tiempo y dinero. El amplio abanico de opciones refleja los compromisos entre la eficacia de la protección y los costes que comporta. Por fortuna, es posible conseguir una protección satisfactoria a un coste razonable.

Como hemos explicado, la protección de un circuito integrado requiere incorporar circuitería adicional. Nuestro grupo investigador de la Universidad de California en Los Angeles ha demostrado que incorporarla no aumentaría el tamaño final del chip más que en un pequeño porcentaje. La protección también disminuye en cierto grado la velocidad del circuito, pues las medidas que garantizan el correcto funcionamiento de los bloques consumen ciclos de reloj que, de otro modo, podrían emplearse para las tareas de operación propias del microchip. Sin embargo, nuestro grupo ha hallado que tal disminución en la velocidad es pequeña. De hecho, la misma podría ser nula si en la protección se empleasen bloques lógicos y funcionales temporalmente inactivos.

Como ya ha sucedido en el mundo de la programación, la seguridad en el equipo físico se ha convertido en una "carrera armamentística" que requiere una innovación constante. Si bien no es posible descargar de Internet circuitos integrados, como se hace con los programas correctores de los fallos detectados en el soporte lógico, los microchips modernos presentan ciertos aspectos reconfigurables que podrían emplearse para sustituir aquellas partes del soporte físico que hayan quedado incapacitadas por un ataque. Una ingeniería flexible constituye la mejor defensa. Aunque los ataques a los circuitos se antojen inevitables, eso no quiere decir que hayan de tener éxito.

El autor

John Villasenor se licenció y doctoró en la Universidad de Stanford. En 1992 ingresó en el departamento de ingeniería de la Universidad de California en Los Angeles. Ha trabajado en métodos de obtención de imágenes espaciales de la Tierra para el Laboratorio de Propulsión a Chorro, de la NASA. Su investigación se centra en los métodos, técnicas y sistemas empleados para capturar información, convertirla a formato digital y transportarla de un lugar a otro con seguridad y eficacia.

Bibliografía complementaria

TROJAN DETECTION USING IC FINGERPRINTING. D. Agrawal et al. en *Proceedings of the 2007 IEEE Symposium on Security and Privacy*. Berkeley, California, mayo de 2007.

OLD TRICK THREATENS THE NEWEST WEAPONS. John Markoff en *New York Times*; 26 de octubre, 2009.

A TROJAN-RESISTANT SYSTEM-ON-CHIP BUS ARCHITECTURE. L. Kim. J. Villasenor y C. Koc en *Proceedings of the 2009 IEEE Military Communications Conference*. Boston, octubre de 2009.

SECURING THE INFORMATION HIGHWAY. Wesley Clark y Peter Levin en *Foreign Affairs*, noviembre/diciembre de 2009.

El juego del diablo

Cómo perderlo todo sin equivocarse nunca

Agustín Rayo

Imaginemos un grupo infinito de personas P_1, P_2, P_3, ... a las que el diablo les propone el siguiente juego: "Voy a pedirle a cada uno de ustedes que diga 'sí' o 'no'. Si sólo un número finito de ustedes responde 'sí', habrá premios para todos: cada persona recibirá tantas monedas de oro como personas hayan contestado afirmativamente. Pero si son demasiado avariciosos y un número *infinito* de ustedes responde 'sí', nadie recibirá nada".

Si los miembros del grupo se pusieran de acuerdo de antemano, podrían obtener tantas monedas como desearan. Bastaría con que escogiesen un número k y se comprometiesen a que las personas P_1, P_2, ..., P_k respondiesen "sí" y todas las demás "no". En tal caso, cada miembro del grupo obtendría k monedas de oro.

Pero el diablo no es tonto. Sabe que podría terminar en bancarrota si permite que el grupo acuerde un plan. Así pues, tras haberles informado de las reglas, decide separar a los miembros del grupo y obliga a cada uno de ellos a contestar sin conocimiento de las respuestas ajenas.

Ahora el diablo puede estar tranquilo. Para comprender por qué, imagine que es usted uno de los miembros del grupo y que ha quedado aislado de sus compañeros. ¿Qué respuesta es mejor, "sí" o "no"?

Dado que se encuentra usted aislado, su decisión no tendrá ningún efecto en la de sus compañeros. Si un número infinito de ellos dice "sí", entonces, con independencia de lo que usted decida, nadie recibirá nada. Ello implica que su respuesta sólo cobrará importancia en caso de que sólo un número finito de sus compañeros conteste afirmativamente. Pero, en semejante situación, resulta evidente que lo que le conviene es decir "sí", ya que ello supondrá una moneda de oro adicional para cada miembro del grupo. En cambio, si contesta "no", no habrá beneficiado a nadie.

Lo racional, por tanto, es responder "sí". Y lo que es racional para usted también lo será para el resto. Es por ello que el diablo no tiene de qué preocuparse: siempre y cuando todos los miembros del grupo sean racionales, todos responderán afirmativamente y él no tendrá que desembolsar ni una sola moneda.

Desde luego, el diablo podría perder mucho dinero si el grupo escogido sólo contiene un número finito de miembros racionales. Pero nuestro diablo se asegurará de que eso no ocurra: nada le produce más placer que torturar a gente plenamente racional.

El diablo también podría someter a una sola persona a tan malévolo pasatiempo. Imagine que le anuncia lo siguiente: "A continuación voy a hacerle una secuencia infinita de preguntas: p_1,



1. EL JUEGO DEL DIABLO. Cada uno de los miembros de un grupo infinito de personas ha de contestar "sí" o "no". Si sólo *N* personas responden "sí", cada miembro del grupo recibirá *N* monedas de oro. Pero si un número infinito de ellos contesta afirmativamente, nadie recibirá nada. ¿Cómo respondería usted?

p_2, p_3... A cada una de ellas deberá responder 'sí' o 'no'. Si sólo responde 'sí' en un número finito de ocasiones, recibirá un premio: tantas monedas de oro como respuestas afirmativas haya dado. Pero tenga cuidado: en caso de contestar 'sí' un número infinito de veces, no recibirá nada" [*véase* "Racionalidad e infinito", por Gabriel Uzquiano; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 2009].

Para que semejante juego tenga sentido no hace falta suponer una vida eterna. Basta con que usted logre responder a las preguntas del diablo cada vez más rápido. Imagine que la segunda pregunta se le formula media hora después de la primera; la tercera, un cuarto de hora después de la segunda; la cuarta, un octavo de hora después de la tercera, y así sucesivamente. (En general, la pregunta p_{n+1} sobreviene $1/2^n$ horas después de la pregunta p_n.) En tal caso bastará una hora para responder a todas las preguntas del diablo. Si el juego comenzó a las doce del mediodía, a la una de la tarde estará usted listo para recibir su recompensa.

Usted podría obtener tantas monedas como quisiera si lograse comprometerse con un plan previo. Al igual que en el caso anterior, bastaría con que escogiese un número k y se limitase a responder "sí" a las primeras k preguntas y "no" a todas las demás.

Pero, ¿logrará usted acatar su propio plan? Imagine que ya ha respondido "sí" a las primeras k preguntas y que el diablo acaba de formularle la pregunta p_{k+1}. De acuerdo con el plan original, ahora debería responder "no". Pero, ¿por qué no cambiar de plan? La idea inicial era responder afirmativamente sólo a las primeras k preguntas. Pero parece claro que existe un plan mejor: responder "sí" a las primeras $k+1$ preguntas, "no" al resto y obtener, en lugar de k monedas de oro, $k+1$ monedas.

El problema, claro está, es que tal razonamiento puede iterarse. Cada vez que su último plan lo comprometa a responder "no", se encontrará tentado a cambiar de plan. Pero si obra de ese modo una y otra vez acabará con las manos vacías, ya que al cabo de una hora habrá respondido "sí" a todas las preguntas.

Hay quienes cuentan con una gran fuerza de voluntad. Algunas personas logran hacer un plan y ceñirse a él incluso si más adelante aparece un plan mejor. Así fue como se comportó Odiseo ante los cantos de las sirenas, tan seductoras que hacían naufragar a cuanto marinero las escuchase. Odiseo pidió a sus compañeros que se tapasen los oídos con cera y que a él lo ataran al mástil del barco, bajo órdenes estrictas de no liberarlo hasta que hubieran dejado atrás a las sirenas. Pero, cuando comenzó a oír sus cantos, a Odiseo le pareció obvio que su plan original debía ser reemplazado por uno mejor: seguir a las sirenas. Por fortuna, sus marineros lo forzaron a someterse al plan original y no lo liberaron hasta que se halló fuera de peligro.

Quienes, al igual que Odiseo, encuentren algún método para controlar sus decisiones futuras estarán en posición de vencer al diablo y obtener tantas monedas de oro como deseen. Pero no todos tenemos esa capacidad.

Lo interesante radica en que el juego del diablo se encuentra diseñado para que cambiar de plan resulte racional. En el caso de Odiseo, el nuevo plan sólo le parecerá buena idea a quien esté bajo la influencia del canto de las sirenas. Pero, en el juego propuesto por el diablo, cualquiera estaría de acuerdo en que el nuevo plan es mejor que el original. Incluso antes de comenzar a contestar, debería usted convenir en que contestar "sí" a sólo las primeras $k+1$ preguntas es una idea mejor que responder afirmativamente a sólo las k primeras preguntas.

Los únicos que lograrían vencer al diablo serían aquellos que basasen sus decisiones en planes que estuviesen dispuestos a admitir como obviamente inferiores. No por nada es el diablo.



2. ODISEO HALLO LA FORMA de controlar sus decisiones futuras y no modificar su plan original aunque con posterioridad se le apareciese un plan mejor (seguir a las sirenas).

¿Quiere saber más?

Los ejemplos expuestos se hallan en un artículo de los filósofos Frank Arntzenius, Adam Elga y John Hawthorne: "Bayesianism, Infinite Decisions, and Binding"; *Mind*, vol. 113, págs. 251-283; 2004. Puede encontrarse en Internet en: **http://philsci-archive.pitt.edu/rchive/00001595/01/15.1.bayesbind.pdf**.

Véase también: Vann McGee, "An airtight Dutch book"; *Analysis*, vol. 59, n.º 4, págs. 257-265; 1999.

Agustín Rayo es investigador en el departamento de filosofía del Instituto de Tecnología de Massachusetts.

Caza de meteoritos

Una lluvia pertinaz de micrometeoritos se abate constantemente sobre el planeta. Con paciencia, quizá logremos capturar alguno

Marc Boada Ferrer

Cuando visito un museo de ciencias naturales, uno de mis primeros objetivos es descubrir si dispone de colección de meteoritos. A menudo es así. De hecho, en los últimos decenios los meteoritos han dejado de ser una rareza para convertirse en un material sometido a un activo comercio, de ahí que sean cada vez más los museos que pueden acceder a una colección sistemática de tan preciadas joyas de la naturaleza.

Para el científico aficionado, la situación es otra. Raramente dispone de excedentes suficientes como para invertir en piedras provenientes del espacio interplanetario. Pero no todo pasa por los ejemplares de gran tamaño. Con un poco de paciencia, podemos crear nuestra propia colección, eso sí, de ejemplares microscópicos.

El espectro de tamaños de los meteoritos es muy amplio y su frecuencia de caída también. Pese a que las tasas de caída se basan en estimaciones, podemos suponer que en nuestro planeta caen, con una cadencia de decenas de millones de años, meteoritos —o, mejor, asteroides— de tamaño kilométrico; cada miles de años caen meteoritos de decenas de metros; y cada día caen millones de meteoritos de milésimas de milímetro de tamaño, los micrometeoritos.

En la actualidad, pese a que no existe un consenso definitivo, se estiman en 2000 o 3000 las toneladas de micrometeoritos que se precipitan en la superficie terrestre, es decir, alrededor de un micrometeorito por metro cuadrado y día. Se trata, sin duda, de una cantidad reducida, pero suficiente para que el intento de recolección valga la pena. Además, debemos tener en cuenta que la recolección de la fracción metálica del polvo cósmico es una tarea relativamente fácil, ya que podemos ayudarnos con un imán potente, de neodimio.

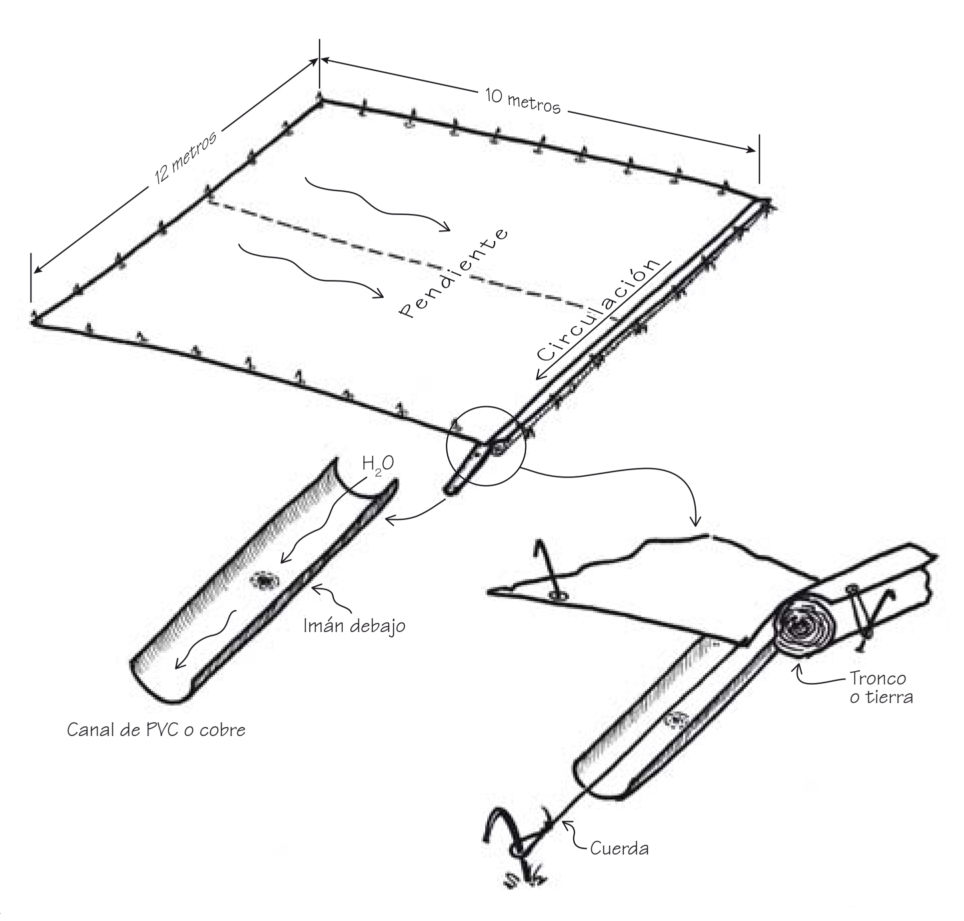
Fue precisamente así como, ya desde principios del siglo pasado, numerosos científicos acometieron la recolección sistemática de micrometeoritos, utilizando a modo de área de recogida el tejado de su propia casa.



MEDIANTE UNA SUPERFICIE de recogida, un sencillo colector de aguas y unos imanes (*insertos*) podemos acometer la obtención de material extraterrestre.

El proceso es simple. Limpiamos el tejado, librándolo de cualquier sedimento, planta, liquen o moho. Colocamos en la salida del bajante un imán de gran potencia y esperamos unos meses. Comprobaremos que el imán queda recubierto de un finísimo polvo magnético, que, a través del microscopio, nos mostrará un amplio abanico de partículas: virutas, filamentos, óxidos más o menos hidratados y, atención, esférulas de entre 50 y 500 micrometros, bien redondas, opacas, negras u oscuras, y de superficie brillante. ¿Son micrometeoroides?

Puede que no porque, en las ciudades, el polvo atmosférico contiene productos de origen industrial, entre ellos pequeñas esferas metálicas procedentes de la combustión del carbón, de centrales térmicas o de plantas incineradoras de residuos. Para nuestro infortunio, son idénticas a las partículas de origen cósmico.



Por tanto, debemos realizar la captura en algún punto alejado de centros industriales y prescindir de los tejados, fuente segura de contaminación antropogénica. Asimismo, puestos en desplazarnos, instalaremos el recolector a la mayor altitud posible. Existen múltiples diseños. En mi caso, y a lo largo de los años, he ensayado tres.

La disposición más simple corresponde a un gran embudo que vierte el agua de lluvia recogida en un vaso alto, debajo del cual hay un imán. Aunque eficaz, el proceso es lento: debemos esperar meses para recoger polvo cósmico.

Un segundo método consiste en colocar un plástico horizontal, ligeramente levantado y tensado con una perforación central. El agua de lluvia pasa por este agujero e incide luego en una placa de Petri dotada también de un imán de neodimio. El principal inconveniente de este dispositivo es el viento, que puede convertirse en un auténtico enemigo y destrozar el montaje.

El último método que he ensayado, con buen resultado, se basó en tender sobre un prado de montaña, a unos 850 metros de altitud y ligeramente inclinado, un enorme toldo de 120 metros cuadrados. Llevé a cabo la recogida de muestras entre los días 5 y 20 de agosto, coincidiendo con las Perseidas —la lluvia de estrellas mas conocida del año—, momento en que nuestro planeta atraviesa una zona del espacio rica en polvo. También en este caso tomé precauciones para dirigir el agua de lluvia y la escorrentía en general hacia un separador magnético.

¿Por qué recogemos el agua de lluvia? El motivo es simple. Cuando llueve, la cosecha de micrometeoritos es mayor, ya que las gotas se forman por nucleación del agua sobre las motas de polvo atmosféricas, entre las cuales se hallan los meteoros que buscamos. La función de los imanes es fijar las partículas que corren junto con el agua para su posterior traslado al laboratorio.

Entrando en detalle, en mi último experimento tomé dos lonas plastificadas e impermeables de 6 × 10 metros cada una. Las situé sobre un prado al que previamente había cortado a ras la hierba, formando una superficie de 12 × 10 metros. Mediante piquetas de tienda de campaña de 250 milímetros de longitud, clavé tres de los cuatro lados de los toldos al suelo (para lograr una buena estabilidad frente al viento, las piquetas deben resituarse hasta que las lonas queden bien tensas y con pocas bolsas).

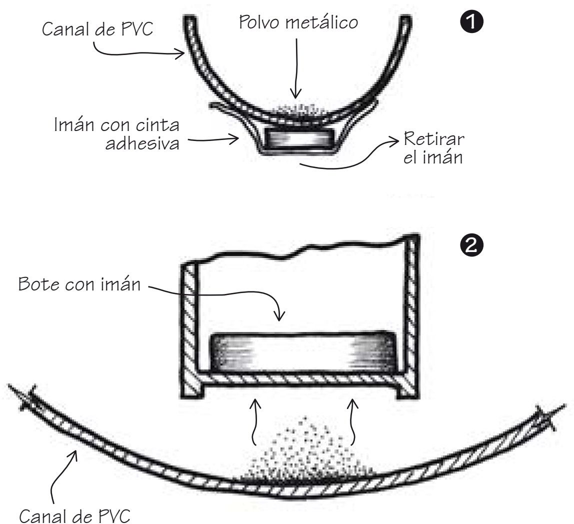
El cuarto lado, el que inicialmente dejamos libre, es el de la zona baja de la superficie, allí donde el agua tiene tendencia a dirigirse. Ya antes de clavar las piquetas, colocaremos en este lado un pequeño resalte (de tierra o con unos troncos) que determinarán un ángulo diedro, un canal, por donde circulará el agua. Nos ayudaremos de una cuerda tensa, que fijaremos también mediante piquetas.

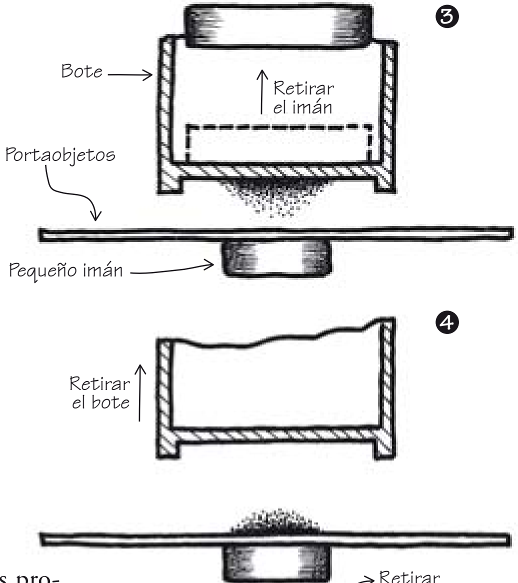
Con el área de recolección a punto, instalaremos en el punto de salida de agua un canal donde realizaremos la separación magnética. Es fundamental que este canal sea totalmente inerte y amagnético. Por ello recomiendo el PVC o el cobre. Situaremos varios imanes, de 30 o 40 milímetros: unos debajo del canal, fijados con cinta adhesiva resistente al agua, y otros en el interior del mismo, colocados previamente dentro de pequeños botes de plástico que pegaremos con un adhesivo reversible (cola termofusible).

Por fin, si disponemos de una toma de agua próxima, realizaremos un lavado inicial de la superficie... y a esperar.

En mi experimento, el período de recolección fue de dos semanas, durante las cuales llovió sólo una vez. Así que me vi obligado a lavar con un potente chorro de agua toda la superficie, barriendo el sedimento y acompa-

MANIPULACION DEL POLVO METALICO





ñándolo hacia el separador magnético. Pese a todo, recogí miles de partículas magnéticas. ¿Habría entre ellas algún micrometeorito?

La única prueba que nos permite determinar si las partículas recogidas son extraterrestres o no es un análisis de la composición química de su interior. Sin embargo, dado que ello escapa a las posibilidades del científico aficionado, recurriremos, en primera aproximación, al estudio morfológico. Los micrometeoritos presentan una superficie esférica brillante característica, debida a los procesos de fusión y solidificación que experimentan al entrar en la atmósfera.

El procedimiento mediante el cual llevaremos las muestras al laboratorio no es sencillo. Con suma precaución, despegaremos y apartaremos el imán grande de la parte inferior de la canaleta de plástico o cobre (*1*). Luego acercaremos, orientado verticalmente, otro imán de menor tamaño que se encuentra en el interior de un pequeño recipiente de plástico (*2*). El polvo magnético se adherirá a éste.

Ya en el laboratorio, colocaremos este bote sobre un portaobjetos, bajo el que habrá otro imán más pequeño (*3*). Retiraremos el imán del bote manteniendo éste inmóvil. Por fin, retiraremos el imán que hay bajo el portaobjetos (*4*). A continuación, para mover las partículas bajo el microscopio, utilizaremos un palillo que en el extremo tenga un hilo de cobre proveniente de un cable eléctrico. Estas micromanipulaciones no son tarea fácil. Requieren un pulso de relojero, que puede tardar días en desarrollarse, pero precisamente por ello resultan muy instructivas.

En mi caso, realizo la selección de piezas interesantes mediante una lupa binocular de 80 aumentos. Para observarlas en detalle utilizo un microscopio dotado de retículo para medir el diámetro de los meteoritos. Con 200 aumentos, los detalles ya son bien visibles.

Este dispositivo admite numerosas variantes, que el experimentador sagaz adaptará a sus posibilidades. Patios de escuela, riachuelos de montaña, el tejado de una cabaña y otros muchos lugares pueden resultar óptimos para la recogida de material extraterrestre. A lo que habrá que añadir aquel microscopio abandonado en un rincón, que se convertirá en un buen aliado del cazador de meteoritos.

LA HORA DE LA VERDAD

La única manera de saber si una partícula es o no un micrometeorito consiste en llevar a cabo un análisis químico de su interior. Dadas las dimensiones de las esférulas recogidas en este tipo de dispositivos, lo más indicado es utilizar un microscopio electrónico de barrido equipado con un analizador de rayos X.

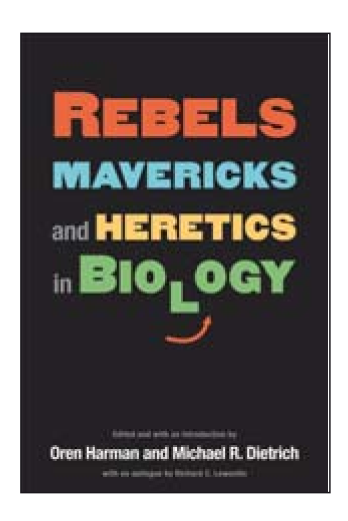
Los meteoritos poseen una concentración de níquel (Ni) relativa a la de hierro (Fe) característica, mucho mayor que la que se encuentra en cualquier roca terrestre. Esta propiedad se conoce ya desde 1799, cuando Joseph Louis Proust analizó un fragmento del meteorito argentino *Campo del cielo*, utilizado por los indígenas para fabricar puntas de flecha y otros útiles. Por tanto, la determinación de la relación Ni/Fe basta para saber si una esférula proviene o no del espacio. La importancia de analizar el interior de las partículas reside en que la superficie puede haberse fundido y la relación Ni/Fe en ésta, variado (el Ni es más volátil que el Fe).

Los análisis efectuados hasta la fecha de esférulas recogidas mediante imanes indican que la gran mayoría de ellas no corresponden a micrometeoritos, sino que proceden de aviones o derivan de actividades industriales. Unicamente en determinadas zonas de Groenlandia y de la Antártida se han recogido cantidades significativas de micrometeoritos, tras filtrar grandes bloques de hielo, fundido de manera natural o mediante chorros de agua caliente.


¿ES O NO un micrometeorito?

Jordi Llorca
Universidad Politécnica de Cataluña

Marc Boada es director de Pendulum Producciones Científicas



REBELS, MAVERICKS, AND HERETICS IN BIOLOGY.
Dirigido por Oren Harman y Michael R. Dietrich.
Yale University Press; New Haven y Londres, 2008.

De héroes y antihéroes

Sobre la generación y gestión del conocimiento en ciencias naturales

En la introducción a *Rebels, Mavericks, and Heretics in Biology*, Oren Harman y Michael R. Dietrich nos invitan a leer este libro desde dos puntos de vista relacionados. Por un lado, proponen un enfoque de la historia de la biología moderna que en principio se aleja de visiones tradicionales basadas en la narración de los grandes descubrimientos realizados por grandes hombres. Frente a la imagen del desarrollo del conocimiento en las ciencias naturales y de los procesos de su profesionalización, legitimación e institucionalización como resultado de la obra laboriosa y brillante de algunos héroes —pocos y, por lo general, hombres—, el libro se centra en un grupo de rebeldes a los que podríamos considerar, al menos en principio por puro contraste, de acuerdo con la premisa, e independientemente del resultado de su rebeldía, como antihéroes. Por otro lado, teniendo en cuenta que la característica fundamental de las contribuciones realizadas por estos personajes es el cuestionamiento y la lucha activa contra los dogmas teóricos, metodológicos o ambos, vigentes en cada campo y en cada momento, los coordinadores nos invitan a adentrarnos en un análisis del papel de la disidencia en el progreso científico.

Harman y Dietrich comienzan señalando la dificultad para establecer los parámetros de definición de la rebeldía y de los rebeldes. Atendiendo a los 19 casos analizados, subrayan la diversidad en relación con las características que podrían tomarse en cuenta para asignar un valor analítico a la rebeldía. Ni los desafíos planteados, en cuanto a su naturaleza, ya sea teórica o metodológica, ni el modo de operación, desde dentro o desde fuera del sistema de autoridad institucional que sanciona la validez del conocimiento en cada contexto, ni su forma de trabajar, bien en equipo o en solitario, ni el desenlace, en cuanto a los procesos y el grado de legitimación del trabajo realizado y de los resultados obtenidos, permiten establecer al "rebelde científico" como una categoría analítica.

En ese contexto, el inconformismo que nos anuncia el título del libro (*mavericks*), si bien tampoco se considera una característica definitoria, sí que se nos presenta como un rasgo de personalidad relativamente común entre los personajes analizados. De hecho, el temperamento inconformista y contestatario se aduce como factor causal, ya sea estrictamente por carácter, ya sea por las circunstancias familiares, educativas y sociales de los personajes, en más de la mitad de los casos que se analizan en el libro. En todo caso, de acuerdo con los coordinadores, el valor de la rebeldía como (anti) categoría analítica radicaría precisamente en su capacidad para contribuir al entendimiento de la complejidad de los mecanismos de generación y gestión del conocimiento científico, más allá de las explicaciones simplificadas que se centran en una exposición teleológica de grandes descubrimientos, y precisamente en relación con el papel de la controversia en estos procesos.

Enfrentados con las limitaciones para definir la rebeldía, considerada finalmente como una cuestión relacionada sobre todo con la personalidad, Harman y Dietrich la diferencian de la iconoclasia, que identifican como una actividad profesional. De acuerdo con su planteamiento, el icono científico se puede definir aproximadamente en los mismos términos que el paradigma kuhniano, de manera que su cuestionamiento —de algún modo la herejía que también anuncia el título del libro— y eventual derribo formaría parte integral de los mecanismos de generación de conocimiento científico. De este modo, la iconoclasia permite unificar los 19 casos que se aportan en el libro con independencia del contexto histórico, de las circunstancias particulares (personales y profesionales) y del modo de operación de cada uno de los personajes, de los campos en los que se mueven dentro de las ciencias naturales, del resultado de su trabajo, y de la naturaleza del desafío planteado por cada uno de ellos, ya sea metodológica, teórica o derivada de resultados experimentales inesperados.

Por otra parte, también se menciona como una característica común la transgresión disciplinar, en tanto que, en la mayoría de los casos, los desafíos planteados a la ciencia normal conllevan una disputa (inter)disciplinaria que, generalmente, suscita un proceso de (re)definición de un campo específico de investigación. De todos modos, aunque los coordinadores hacen un breve análisis de los mecanismos por los cuales se establecen los iconos, y a pesar del interés sobre el papel de la controversia en la generación de conocimiento científico, se centran finalmente en la posibilidad de establecer una categorización de los diferentes tipos de desafíos y prácticas iconoclastas (metodológicas, teóricas, experimentales) a través de los casos presentados.

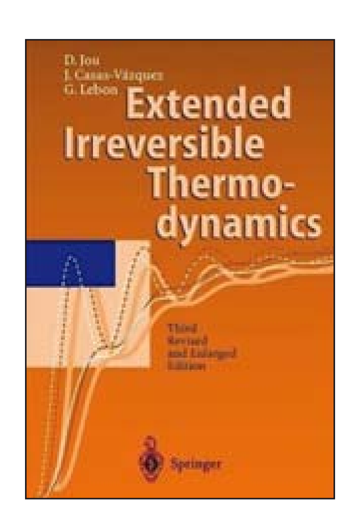
En conjunto, el libro responde sin duda a las expectativas en tanto que resulta tremendamente sugerente sumergirse en las vidas de estos 19 personajes, sobre todo desde el punto de vista del análisis de las dinámicas de planteamiento y eventual resolución de controversias en los procesos de generación de conocimiento científico. Por otra parte, el período que cubren las historias presentadas (los últimos 150 años) y los temas elegidos (principalmente las problemáticas relacionadas con los mecanismos de la herencia y de la evolución, desde el nivel molecular al ecológico) permiten que el libro ofrezca una amplia panorámica de la complejidad de los procesos de construcción, establecimiento y legitimación teórica, metodológica y disciplinar de la biología moderna.

Sin embargo, aunque la aventura historiográfica se plantea como alternativa a visiones tradicionales de la historia de la ciencia, el resultado final no deja de

ser un ejercicio hagiográfico de exaltación de la vida y obra de unos pocos actores que, en virtud de su inconformismo, pero también de su brillantez y de su tenacidad, contribuyeron significativamente al progreso del conocimiento en las ciencias naturales. En este sentido, resulta difícil diferenciarlos de otros "grandes hombres" y de sus "grandes descubrimientos". Harman y Dietrich señalan la dificultad de selección de casos puesto que, desde la perspectiva de los mecanismos de generación y gestión de conocimiento científico, las diferencias con otros "héroes" no son tan claras: casi todos los "rebeldes" tratados en el libro eventualmente tuvieron éxito y reconocimiento profesional e institucional en relación con sus desafíos (sólo hay tres excepciones), lo cual hace difícil su categorización como "antihéroes". Cabe destacar que sólo dos mujeres forman parte del elenco elegido (Barbara McClintock y Thelma Rowell), lo que permite una estimulante introducción a dinámicas de inclusión-exclusión disciplinar basadas en el género.

Y finalmente, las historias se desarrollan principalmente atendiendo a los contextos profesionales e institucionales de los protagonistas, dejando de lado en la mayoría de los casos consideraciones culturales más amplias relacionadas con los mecanismos de construcción, legitimación o rechazo tanto de dogmas como de disidencias y controversias. Si bien el libro reseñado da un paso importante en esta dirección, deja claro que queda mucho trabajo por hacer.

Carlos Tabernero Holgado



EXTENDED IRREVERSIBLE THERMODYNAMICS (4ª edición),

por David Jou, José Casas-Vázquez y Georgy Lebon. Springer Verlag; Berlín, 2010.

Termodinámica

Puesta al día

La presencia de textos de científicos españoles en el contexto internacional ha ido creciendo los últimos años como consecuencia del importante desarrollo alcanzado por la comunidad científica del país. Sin embargo, incluso en el contexto internacional, no es frecuente contar con un gran número de textos científicos especializados que alcancen una cuarta edición. Llegar a este hito sería una meritoria proeza, que tal vez no justificaría una nueva recensión [*véase* "Física española. Termodinámica irreversible", por Josep Enric Llebot, Investigación y Ciencia, agosto de 1995] si no fuera por la importante renovación y puesta al día realizada en esta nueva edición, que muestra no sólo la calidad del trabajo de los autores sino su continuo empeño en desarrollar y explicar los nuevos entornos en los cuales se aplica la termodinámica irreversible extendida, al tiempo que ofrece nuevas visiones e interpretaciones.

Si bien los autores se mantienen fieles a las ideas originales de la teoría (el postulado de una entropía de no equilibrio que depende de los flujos además de las variables termodinámicas usuales) y, en líneas generales, conservan la estructura del libro (presentación macroscópica, fundamentación mecánico estadística y aplicaciones), han tratado de reflejar en esta nueva edición los progresos efectuados en la última década.

Por un lado, se ha aligerado el tratamiento de algunos temas, para cuyo análisis el lector es remitido a la publicación de los mismos autores *Understanding non-equilibrium thermodynamics. Foundations, applications, frontiers* (Springer, 2008). Esta obra proporciona, con un espíritu especialmente didáctico, una amplia visión del estado actual de la termodinámica de no equilibrio. Con ello, los autores evitan repeticiones y ganan espacio para acoger en esta nueva edición más material novedoso.

Por otro lado, los autores ponen al día el texto: nuevas aplicaciones, nuevas fronteras conceptuales, nuevas clarificaciones en temas que hace diez años resultaban todavía vacilantes. Una novedad especialmente significativa de la obra es el desglose del transporte de calor en dos capítulos (9 y 10), el segundo de los cuales está dedicado íntegramente a nanosistemas, tema de gran actualidad y ausente en las ediciones anteriores. Efectivamente, las ecuaciones obtenidas hace años en la termodinámica irreversible extendida a partir de motivaciones puramente teóricas están cosechando numerosos resultados en su aplicación a sistemas miniaturizados, de tamaño equiparable al recorrido libre medio de las partículas. Ello enriquece de forma notable la faceta de las aplicaciones de la teoría.

Otras aportaciones destacables corresponden a la inclusión del estudio de materiales termoplásticos y plásticos en el capítulo 15 (que antes estaba tan sólo dedicado a la reología de fluidos) y la incorporación del estudio de suspensiones y de solidificación rápida en fluidos altamente subenfriados en el capítulo 13 (material que había sido incorporado a la traducción rusa de la obra, hace cinco años). En lo que atañe a temas más conceptuales, destaca el enriquecimiento de la presentación de las ecuaciones de estado de no equilibrio en el capítulo 3, que se beneficia de la experiencia adquirida con el trabajo de revisión sobre temperatura de no equilibrio publicado por Casas-Vázquez y Jou en *Reports on Progress in Physics* en 2003 y la incorporación al último capítulo, el 18, dedicado a modelos cosmológicos viscosos, de nuevas visiones de una expansión acelerada, que permite establecer contacto con fronteras actuales de la energía oscura.

En definitiva, los autores han conseguido plenamente el objetivo de que una obra publicada inicialmente en 1993 siga siendo hoy una referencia nueva y actual, un clásico de su especialidad.

Josep Enric Llebot

EN EL PROXIMO MES DE NOVIEMBRE

NUMERO MONOGRAFICO



Todas las historias tienen un final

MEDICINA ¿Por qué no somos inmortales?

ANTROPOLOGIA Los últimos indígenas

COSMOLOGIA El fin del tiempo

MEDIOAMBIENTE ¿Estamos agotando el planeta?

BIOETICA Trasplantes: entre la vida y la muerte

DEMOGRAFIA Envejecimiento de la población

PROSPECTIVA ¿Qué nos depara el futuro?